

ПРОВЕРКА ЗАКОНА СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Учебно-методическое пособие к лабораторной работе № 5.6
по дисциплине «Физика»

Владивосток
2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Дальневосточный федеральный университет
Школа естественных наук

ПРОВЕРКА ЗАКОНА СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Учебно-методическое пособие к лабораторной работе № 5.6 по дисциплине «Физика»

Владивосток
Дальневосточный федеральный университет

УДК 53 (о76.5)

ББК 22. 343

Э41

Составитель: О.В.Плотникова

Проверка закона Стефана-Больцмана: учебно-методич. пособие к лабораторной работе № 5.6 по дисциплине «Физика» / Дальневосточный федеральный университет, Школа естественных наук [сост. О.В.Плотникова]. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2013. - с.

Пособие, подготовленное на кафедре общей физики Школы естественных наук ДВФУ, содержит краткий теоретический материал по теме «Тепловое излучение» и инструктаж к выполнению лабораторной работы «Проверка закона Стефана-Больцмана» по дисциплине «Физика».

Для студентов-бакалавров ДВФУ.

УДК 53 (о76.5)

ББК 22. 343

Концевой титул

Учебное издание

Составитель:

Плотникова Ольга Васильевна

ПРОВЕРКА ЗАКОНА СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Учебно-методическое пособие к лабораторной работе

№ 5.6 по дисциплине «Физика»

В авторской редакции

Компьютерная верстка

Подписано в печать

Формат 60х84/16. Усл.печ.л. Уч.-изд.л.

Тираж экз. Заказ

Дальневосточный федеральный университет

690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

Отпечатано на кафедре общей физики ШЕН ДВФУ

690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

Цель работы: Исследовать зависимость энергетической светимости (интегральной испускательной способности) нити накала лампы от температуры. Изучить законы теплового излучения абсолютно черного и серого тела.

Краткая теория

1. Тепловое излучение, его равновесный характер.

Тепловое излучение - испускание электромагнитных волн за счет внутренней (тепловой) энергии тел. Это излучение сильно зависит от температуры, его интенсивность увеличивается при нагревании тела. Тепловое излучение можно поддерживать неизменным, подводя непрерывно к телу соответствующее количество энергии. Тепловое излучение является равновесным. Для него характерно то, что потеря атомами энергии на излучение компенсируется за счет энергии их теплового движения. Чем выше температура тела, тем быстрее движутся его частицы. При столкновении частиц друг с другом часть их кинетической энергии превращается в энергию возбуждения атомов, которые затем отдают ее в виде излучения. Состояние системы называется равновесным, если распределение энергии между телом и излучением остается неизменным во времени. Для теплового излучения такое состояние устанавливается самопроизвольно.

2. Основные характеристики теплового излучения

Основными характеристиками теплового излучения являются: энергетическая светимость, испускательная и поглощательная способности.

А). **Энергетическая светимость (интегральная испускательная способность) R_T** - поток энергии, испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям во всем интервале длин волн (частот). Это функция температуры.

Б). **Испускательная способность $r_{\lambda,T}$** - это поток энергии, испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям в единичном интервале длин волн (частот).

Излучение состоит из волн различных длин λ . Пусть $dR_{\lambda,T}$ - поток энергии, испускаемый единицей поверхности тела в интервале длин волн $d\lambda$. При малом $d\lambda$ поток $dR_{\lambda,T}$ будет пропорционален $d\lambda$:

$$dR_{\lambda,T} = r_{\lambda,T} d\lambda.$$

Величина $r_{\lambda,T}$ - это и есть испускательная способность тела. Это функция длины волны и температуры (или частоты и температуры $r_{\omega,T}$).

В). **Поглощательная способность $a_{\lambda,T}$** - это отношение потока энергии, поглощенной телом, ко всему падающему на тело потоку энергии.

Пусть на элементарную площадку поверхности тела падает поток лучистой энергии $d\Phi_{\lambda}$, обусловленный электромагнитными волнами, длина волны которых заключена в интервале $d\lambda$. Часть этого потока $d\Phi'_{\lambda,T}$ будет поглощена телом. Безразмерная величина

$$a_{\lambda,T} = d\Phi'_{\lambda,T} / d\Phi_{\lambda}$$

называется поглощательной способностью тела. Это функция длины волны и температуры (или частоты и температуры).

Закономерности теплового излучения объясняет квантовая теория. Физические тела поглощают и излучают по-разному. Различают: а) абсолютно черное тело (АЧТ), которое поглощает излучение всех длин волн, т.е. его поглощательная способность $a=1$; б) абсолютно белое тело (АБТ), которое отражает все падающее на него излучение, т.е. $a=0$; в) нечерное тело, $0 < a_{\lambda,T} < 1$; г) серое тело, если $0 < a_T < 1$ и не зависит от длины волны λ .

3. Законы теплового излучения.

Закон Кирхгофа:

Отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией длины волны (частоты) и температуры:

$$(r_{\lambda,T} / a_{\lambda,T})_1 = (r_{\lambda,T} / a_{\lambda,T})_2 = (r_{\lambda,T} / a_{\lambda,T})_3 = \dots = (r_{\lambda,T} / a)_{\text{АЧТ}} = f(\lambda, T).$$

Так как для абсолютно черного тела поглощательная способность $a=1$, то, следовательно, универсальная функция Кирхгофа $f(\lambda, T)$ равна испускательной способности абсолютно черного тела.

Закон Стефана-Больцмана:

Энергетическая светимость абсолютно черного тела прямо пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$R_T = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4,$$

где σ - постоянная величина, T - абсолютная температура.

Константа σ - постоянная Стефана- Больцмана:

$$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$$

Закон смещения Вина: Длина волны λ_{max} , на которую приходится максимум испускательной способности абсолютно черного тела, обратно пропорциональна величине абсолютной температуры тела:

$$\lambda_{\text{max}} = b / T.$$

b – постоянная Вина - имеет значение: $b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ мК}$.

Зависимость испускательной способности от длины волны излучения показана на рис.1.

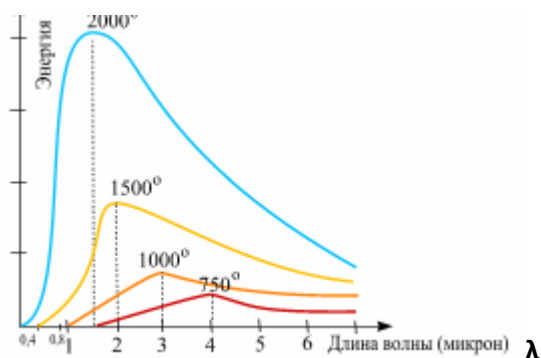


Рис. 1. График зависимости испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны

4. Объяснение законов теплового излучения.

Рэлей и Джинс сделали попытку объяснить законы теплового излучения и получить выражение для универсальной функции Кирхгофа (испускательной способности абсолютно черного тела) исходя из волновых представлений об излучении и закона о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Ими было получено выражение:

$$f(\omega, T) = (\omega^2 / 4\pi^2 c^2) \cdot kT,$$

которое называется формулой Рэля-Джинса.

Интегрирование этого выражения по ω в пределах от 0 до ∞ дает для равновесной плотности энергии излучения $u(T)$ бесконечно большое значение, что безусловно противоречило опытным данным. Кривая, построенная в соответствии с формулой Рэля-Джинса (на рис., 1 изображена пунктиром) удовлетворительно согласуется с экспериментальной кривой только при больших длинах волн, а для малых длин волн уходит в бесконечность. Этот результат в истории физики получил название ультрафиолетовой катастрофы.

Выход из сложившегося положения был найден немецким физиком Максом Планком, выдвинувшим квантовую гипотезу. Планк предположил, что атомы испускают электромагнитную энергию не непрерывно, а отдельными порциями — квантами. Энергия E каждой порции прямо пропорциональна частоте ν и обратно пропорциональна длине волны излучения:

$$E = h\nu = hc/\lambda.$$

Коэффициент пропорциональности h получил название постоянной Планка и является одной из фундаментальных физических постоянных:

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Часто в расчетах используется приведенная постоянная Планка:

$\hbar = h/2\pi$. При этом энергия кванта находится: $E = \hbar\omega$, где ω — круговая частота ($\omega = 2\pi\nu$).

Используя квантовую гипотезу, Планк получил выражение для испускательной способности абсолютно черного тела:

$$f(\lambda, T) = r_{\lambda T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/k\lambda T) - 1},$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Это выражение давало зависимость $r_{\lambda,T}$ от длины волны излучения, соответствующую опытным данным, и позволило теоретически вывести законы теплового излучения, полученные ранее опытным путем:

Интегрируя формулу Планка по всему спектральному интервалу, получаем закон Стефана-Больцмана:

$$R_T = \int_0^\infty \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{\frac{hc}{kT\lambda} - 1} = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4.$$

Если же решить задачу на нахождение экстремума функции Планка $r_{\lambda,T}$: $\frac{dr_{\lambda,T}}{d\lambda} = 0$, то получим закон Вина.

5. Оптическая пирометрия, пирометры.

Система методов измерения температуры тела, основанных на использовании законов теплового излучения, называется оптической пирометрией.

Пирометр с исчезающей нитью.

В фокусе объектива помещается электрическая лампа со специальной нитью, изогнутой в форме полуокружности. Излучение, исходящее от исследуемой поверхности направляется в объектив, дающий изображение в главном фокусе, совмещенное с нитью лампы. Красное стекло, помещенное между глазом и окуляром фильтрует свет. Подбирается такой ток, чтобы излучательная способность нити и изучаемого тела оказались совпадающими- накаливаемая часть нити лампы перестает быть видима на фоне изображения светящегося тела («исчезающая нить»). Чтобы определить по найденному значению яркостной температуры истинную температуру используют специальные формулы.

Описание экспериментальной установки

Общий вид установки показан на рис.2.

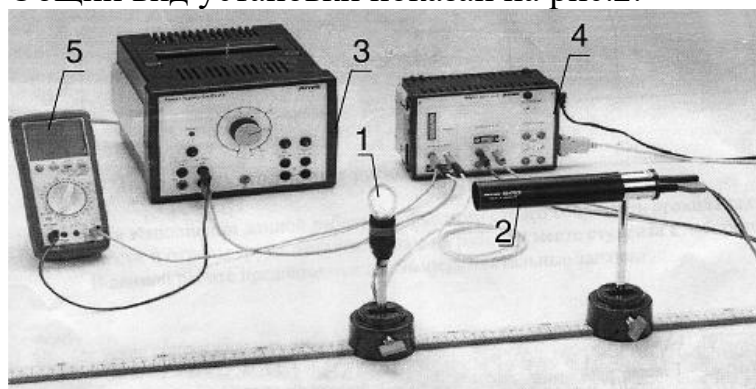


Рис. 2. Экспериментальная установка для изучения закона Стефана-Больцмана.

На переднем плане показана лампа - 1 и термоэлемент - 2, расстояние между которыми должно составлять 20 см, источник питания

- **3** и универсальный блок Cobra-3 – **4**. Источник питания лампы соединен с цифровым мультиметром - **5** и блоком Cobra-3. Универсальный блок Cobra-3 соединяется с компьютером через USB-порт. Напряжение U_1 на лампе снимается с выхода «Analog Jn 1/S1» универсальной установки, а ток $I_{1эф}$, текущий через лампу, измеряется с помощью цифрового мультиметра. Источник питания используется как источник переменного напряжения (АС на мультиметре). Значение термо-ЭДС термоэлемента U_2 снимается с выхода «Analog Jn 2/S2» универсальной установки.

Теория метода

Целью работы является проверка закона Стефана –Больцмана. Согласно данному закону излучаемая нагретым телом энергия должна быть пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры. Задача эксперимента – показать, что в выражении

$$R = \sigma T^n \quad \text{показатель степени } n=4.$$

В данной лабораторной работе используется излучение вольфрамовой нити накала лампы (серой тело). Излучение от нити попадает на термоэлемент; при фиксированном расстоянии между лампой и термоэлементом термо-ЭДС, обозначаемая $U_{ТЭ}$, будет пропорциональна энергетической светимости лампы, а значит, должна быть пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры нити.

Задача решается графическим методом, причем удобнее строить график в логарифмических осях.

Запишем: $U_{ТЭ} = KR_T$, где $U_{ТЭ}$ – термо-ЭДС, R_T – энергетическая светимость, K – коэффициент пропорциональности. Отсюда:

$$U_{ТЭ} = K\sigma T^n = AT^n, \quad \text{где } A \text{ – коэффициент, не зависящий от температуры.}$$

Прологарифмируем это выражение:

$$\ln U_{ТЭ} = \ln A + n \ln T.$$

Если построить график в осях $\ln U_{ТЭ}$, $\ln T$, провести линейную аппроксимацию и найти тангенс угла наклона прямой, то он и будет давать значение n :

$$n = \Delta(\ln U_{ТЭ}) / \Delta(\ln T). \quad (1)$$

Температуру нити накала T можно определить по сопротивлению R нити накала лампы, которая зависит от температуры по известной формуле:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$$

где R_0 – сопротивление при температуре 0°C ; $\alpha = 4,82 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$;

$\beta = 6,76 \cdot 10^{-7} \text{K}^{-2}$; t – температура по шкале Цельсия.

Т.к. в данной работе не предусмотрено охлаждать нить до 0°C , то сопротивление R_0 рассчитывают по сопротивлению $R_{ком}$ при комнатной температуре $t_{ком}$:

$$R_0 = \frac{R_{ком}}{1 + \alpha t_{ком} + \beta t_{ком}^2}. \quad (2)$$

$$R_{\text{ком}} \text{ найдем из закона Ома: } R_{\text{ком}} = \frac{U_{1\text{эф}}}{I_{1\text{эф}}}, \quad (3) \quad \text{где}$$

$U_{1\text{эф}}$ - эффективное напряжение на лампе, $I_{1\text{эф}}$ – эффективная сила тока через лампу.

Зная R_0 и измеряя сопротивление R при различных значениях силы тока через лампу, можно определять температуру накала нити:

$$T = 273 + \frac{1}{2\beta} \left[\sqrt{\alpha^2 + 4\beta \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right)} - \alpha \right] \quad (4)$$

Порядок выполнения работы

Запустите программу “Measure”, далее надо выбрать “Gauge” («Прибор»), затем “Universal Writer” («Универсальный измеритель»), в закладке “Fast measurement” («Быстрое измерение») установите параметры, как на рис. 3.



Рис. 3. Окно параметров “Universal Writer”

Задание 1. Определение сопротивления нити накала лампы при температуре 0°C.

1. Подайте напряжение U_1 такое, чтобы ток через лампу был равен $I_{1\text{эф}} = 100$ мА. При таком слабом токе нагреванием нити можно пренебречь и определить сопротивление нити накала при комнатной температуре $R_{\text{ком}}$, используя формулу (3).

2. Начните измерение, нажав кнопку “Continue” («Далее») в окне “Fast measurement”. Нажав “Start”, получим графики зависимости напряжений U_1 и U_2 от времени. Выберите U_1 , отключив U_2 . Полученный график можно улучшить, используя функцию “Analysis” («Анализ») и далее “Smooth” («Сгладить»).

3. Определите для полученного графика интервал напряжения ΔU_1 между максимальным и минимальным его значениями, щелкнув по графику правой кнопкой мыши и выбрав «Параметры дисплея». Разделив ΔU_1 на 2, найдите амплитудное значение U_1 , а разделив его еще на $\sqrt{2}$, найдите $U_{1\text{эф}}$.

4. По формуле (3) найдите $R_{\text{ком}}$. Пользуясь термометром, измерьте комнатную температуру $t_{\text{ком}}$ и найдите R_0 по формуле (2). Данные занесите в таблицу 1.

Таблица 1

$I_{\text{лф}}, \text{ A}$	$T_{\text{ком}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta U_1, \text{ B}$	$U_{\text{лф}}, \text{ B}$	$R_{\text{ком}}, \text{ Ом}$	$R_0, \text{ Ом}$

Чтобы выполнить следующее задание, необходимо вернуться к окну измерений, нажав Ctrl+N.

Задание 2. Проверка закона Стефана-Больцмана.

1. Установите ноль термо-ЭДС. Для этого при выключенной лампе ($I_{\text{лф}} = 0$) в окне измерений величины U_2 на дисплее (график U_2 получаем и сглаживаем так же, как описано в п.2 Задания 1) определите среднее значение термо-ЭДС \bar{U}_{20} , используя функцию "Show average value" («Показать среднее значение») программы "Analysis". В дальнейшем, измеряя термо-ЭДС, следует делать поправку на эту величину.
2. Вернитесь к окну измерений (Ctrl+N). Установите ток на лампе $I_{\text{лф}} = 2,5 \text{ A}$. Подождите 1 минуту для термостабилизации термоэлемента. Как и ранее, определите эффективное значение напряжения на лампе $U_{\text{лф}}$ (см. п.3 задания 1).
3. Определите среднее значение термо-ЭДС \bar{U}_2^* для данного значения силы тока (см. п. 1) и сделайте поправку на величину \bar{U}_{20} :

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_2^* - \bar{U}_{20} \text{ ю}$$
4. Увеличивая силу тока до 7 A через каждые 0,5 A, проведите измерения аналогично п.п.2,3. Перед вводом каждого нового значения силы тока необходимо возвращаться к окну измерений (Ctrl+N).
5. По формуле (3) вычислите значение сопротивления нити накала лампы R и по формуле (4) найдите ее температуру для каждого значения силы тока. Все вычисления можно сделать, используя функцию «Channel modification» программы «Analysis».
6. Заполните таблицу 2

Таблица 2

$I_{\text{лф}}, \text{ A}$	$\Delta U_1, \text{ B}$	$U_{\text{лф}}, \text{ B}$	$R, \text{ Ом}$	$T, \text{ K}$	$\bar{U}_{20}, \text{ B}$	$\bar{U}_2^*, \text{ B}$	$\bar{U}_2, \text{ B}$	$\ln T$	$\ln U_2$
2,5									
3									
...									

7. Постройте график зависимости $\ln \bar{U}_2$ от $\ln T$. Проведите линейную аппроксимацию и определите значение показателя степени в законе

Стефана-Больцмана по формуле (1): $n = \Delta(\ln \bar{U}_2) / \Delta(\ln T)$. Сравните с теоретическим значением ($n=4$), сделайте вывод.

Заполнение таблицы и построение графика можно выполнить с помощью программы «Measurement», используя функцию «Enter data manually».

Контрольные вопросы:

1. Почему тепловое излучение является равновесным?
2. Дайте определение основных характеристик теплового излучения: энергетической светимости, испускательной и поглощательной способностей. Как они связаны?
3. Какое тело называется абсолютно черным? Абсолютно белым? Серым? Приведите примеры.
4. Сформулируйте основные законы теплового излучения. В чем физический смысл универсальной функции Кирхгофа?
5. В чем заключается квантовая гипотеза Планка? Как найти энергию кванта?
6. Запишите и поясните формулу Планка для испускательной способности абсолютно черного тела.
7. Что такое пирометр? Объясните работу пирометра с исчезающей нитью.

Литература:

1. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие для вузов М.: Высшая школа, 2002-2009 г.г. – 544с.
2. Савельев И.В. Курс физики: Том 1- 3. Уч. пособие. В 3-х тт. 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2008г.
3. Грабовский Р. И. Курс физики. СПб: издательство «Лань», 2009. – 307с.
4. Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Том 1-3. СПб: «Лань», 2007. - 340 с

