

Московский Государственный технический Университет им. Н.Э. Баумана

И.Н. ФЕТИСОВ

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОТОКА
ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРНОГО ТЕЛА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ
СТЕФАНА - БОЛЬЦМАНА И ПЛАНКА**

Методические указания к лабораторной работе К-13 по курсу общей физики

2025 г.

Рассмотрены законы теплового излучения, изложена методика изучения закона Стефана – Больцмана и определения постоянных Стефана – Больцмана и Планка, описана лабораторная установка. Для студентов 2-го курса всех специальностей.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловое излучение – это электромагнитные волны, испускаемые всеми телами за счет их внутренней энергии при температуре выше абсолютного нуля. С повышением температуры энергия излучения резко возрастает, а максимум протяженного спектра смещается к более коротким волнам, так что при $T > 1000$ К тела испускают видимый свет.

Цель работы – ознакомление с законами теплового излучения, экспериментальное подтверждение закона Стефана – Больцмана.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Законы теплового излучения

Рассмотрим энергетические величины для излучения:

энергия излучения W , Дж;

поток излучения (мощность излучения) $\Phi = W/t$, Вт;

энергетическая светимость (излучательность) $M = \Phi/S$, Вт/м² – отношение потока излучения к площади поверхности источника излучения.

Распределение энергии излучения по длинам волн λ характеризуют *спектральной плотностью энергетической светимости*:

$$M_\lambda = dM/d\lambda,$$

где dM – энергетическая светимость в интервале от λ до $\lambda+d\lambda$. Интегральная M (Вт/м²) и спектральная M_λ (Вт/м³) светимости связаны соотношением:

$$M = \int_0^{\infty} M_\lambda d\lambda$$

Интенсивность излучения зависит не только от температуры тела, но также от его способности поглощать излучение, которая характеризуется *спектральным коэффициентом поглощения (поглощательной способностью)*:

$$\alpha_{\lambda} = \Phi_{\text{погл}} / \Phi,$$

где $\Phi_{\text{погл}}$ и Φ – поглощенный и падающий потоки, соответственно.

Например, для идеального зеркала $\alpha_{\lambda} = 0$. Рассматривают абстрактное *абсолютно черное тело* (АЧТ), для которого $\alpha_{\lambda}=1$ для любых длин волн и температур.

Ниже приведены основные законы теплового излучения.

Закон Кирхгофа. Для всех тел, включая и АЧТ, при одинаковых λ и T отношение спектральной плотности энергетической светимости (M_{λ}) к поглотительной способности (α_{λ}) – одинаковое:

$$(M_{\lambda}/\alpha_{\lambda})_1 = (M_{\lambda}/\alpha_{\lambda})_2 = \dots = (M_{\lambda}/1)_{\text{АЧТ}}.$$

Демонстрация закона: графит и блестящий кусок металла нагревают до одинаковой высокой температуры. В согласии с законом Кирхгофа, графит – с большей поглотительной способностью – излучает более яркий свет.

Закон Стефана – Больцмана. Для АЧТ энергетическая светимость пропорциональна абсолютной температуре в четвертой степени:

$$M_{\text{АЧТ}} = \sigma T^4, \quad (1)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – *постоянная Стефана – Больцмана*. Например, $M_{\text{АЧТ}} = 430 \text{ Вт/м}^2$ при $T = 295 \text{ К}$.

Для АЧТ с площадью поверхности S поток излучения

$$\Phi_{\text{АЧТ}} = S M_{\text{АЧТ}} = S \sigma T^4, \quad (2)$$

а за время t энергия излучения $W = S \sigma T^4 t$.

Для *серых* тел коэффициент $\alpha_{\lambda} < 1$, но примерно постоянен в существенной области изменения λ и T . Для серых тел закон Стефана – Больцмана (С-Б):

$$M_{\text{сер}} = \varepsilon \sigma T^4.$$

Безразмерный множитель $\varepsilon < 1$ называют *коэффициентом излучения* (*коэффициентом черноты*). Он зависит от материала и состояния его поверхности, например, $\varepsilon = 0,25$ – для окисленного алюминия и $\varepsilon = 0,6 \dots 0,9$ – для кирпича.

Закон излучения Планка. Для АЧТ спектральная плотность энергетической светимости является следующей функцией длины волны и температуры:

$$M_{\lambda, АЧТ} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (3)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света, k – постоянная Больцмана.

При постоянной температуре зависимость (3) описывает спектр теплового излучения, примеры которого представлены на рис. 1 (*поправка*: единица измерения по оси ординат – Вт/м³).

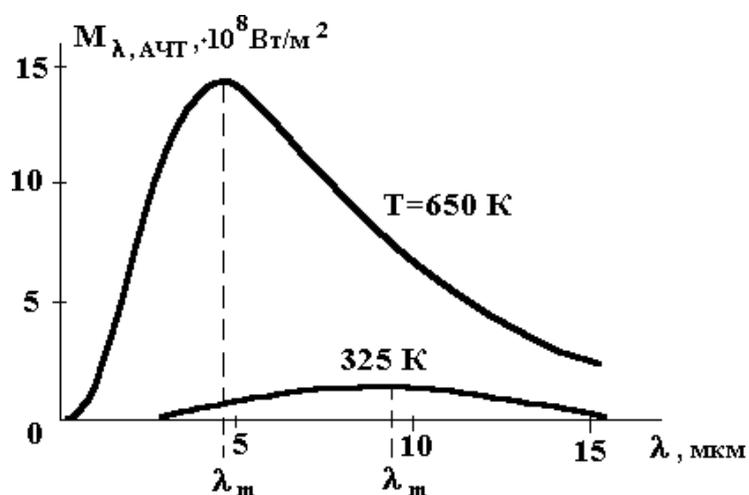


Рис. 1

Спектры теплового излучения АЧТ

Формула (3) получена М. Планком в предположении, что атомные осцилляторы испускают электромагнитные волны порциями, *квантами*, энергия которых пропорциональна частоте излучения ν :

$$E = h\nu.$$

Коэффициент пропорциональности $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с называют *постоянной Планка*.

Закон смещения Вина. Спектральная плотность энергетической светимости максимальна на длине волны λ_m (рис. 1). Согласно *закону смещения Вина*, длина волны λ_m обратно пропорциональна температуре АЧТ:

$$\lambda_m = b/T,$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ К·м есть *постоянная Вина*. Например, Солнце при температуре $T = 5800$ К излучает наиболее интенсивно желто-зеленый свет с $\lambda_m = 0,5$ мкм.

Оба закона, Вина и Стефана – Больцмана, открытые ранее закона Планка (3), следуют из последнего. Так, закон С – Б получают интегрированием функции (3) по длине волны:

$$M_{AЧТ} = \int_0^{\infty} M_{\lambda, AЧТ} d\lambda = \sigma T^4$$
$$\sigma = 2\pi^5 k^4 / (15c^2 h^3).$$

Отсюда следует формула для нахождения постоянной Планка по результатам измерения постоянной С-Б (так поступают и в данной работе):

$$h = \pi k \left(\frac{2\pi^2 k}{15c^2 \sigma} \right)^{1/3} \quad (4)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Методика опыта

Для изучения закона Стефана-Больцмана используют специальную лампу, содержащую *полупроводниковый* стержень длиной 4 мм и диаметром 0,2 мм (рис. 2). Нагреваемый током стержень испускает тепловое излучение.

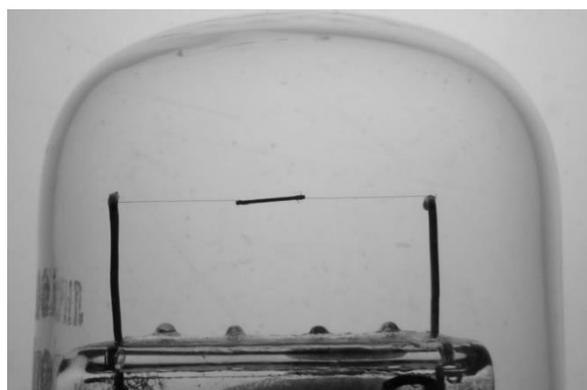


Рис. 2. Лампа для изучения теплового излучения. Нагреваемый током стержень из полупроводника служит излучателем и термометром для измерения собственной температуры.

Вольфрамовые нити, подводящие ток к стержню, имеют малое сопротивление по сравнению с сопротивлением стержня. Вследствие малой теплопроводности тонких нитей, а также сильно разреженного воздуха в лампе, почти вся выделяющаяся в стержне теплота уносится излучением. Стержень из окислов металлов мало отличается от АЧТ. Температуру стержня измеряют косвенно, исходя из его сопротивления. Описанная выше лампа, называемая *терморезистором прямого подогрева* типа ТП-6/2, применяется в электронике.

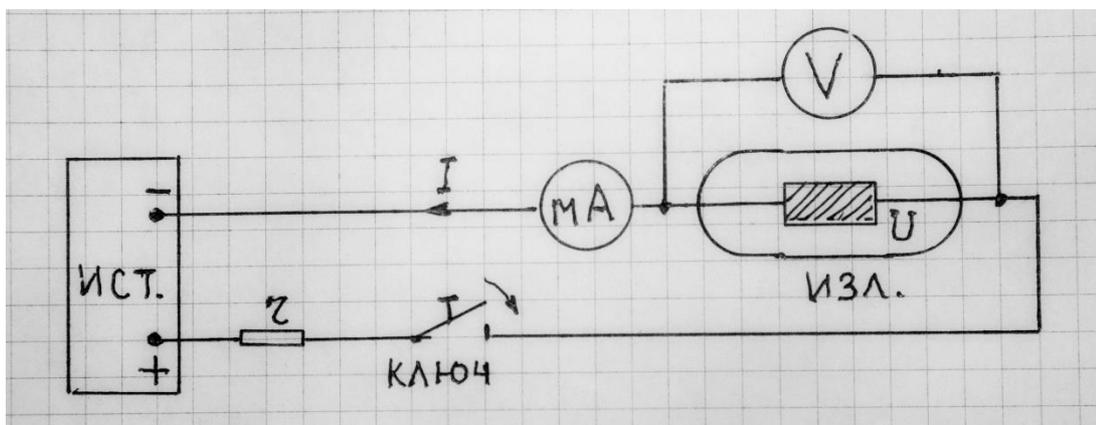


Рис. 3. Схема установки.

Электрическая схема представлена на рис. 3. Стержень (излучатель ИЗЛ) подключен к источнику постоянного тока (ИСТ) последовательно с миллиамперметром (мА), резистором (r) для ограничения тока и ключом. В работе измеряют напряжение U на концах стержня и силу протекающего тока I . Сопротивление стержня находят косвенно: $R = U/I$.

Измерив R , находят температуру излучателя T по известной зависимости для полупроводников:

$$R = A \exp(B/T),$$

где A , Ом и B , К - коэффициенты. Логарифмируя это выражение, получим формулу для определения температуры излучателя в Кельвинах:

$$T = B / \ln(R/A). \quad (5)$$

Для каждой лампы коэффициенты A и B измерены и приведены на установке.

Итак, стержень служит не только излучателем, но также и термометром для измерения собственной температуры.

Излучатель получает энергии (за единицу времени): электрическую (IU) и (P_1) – в результате поглощения теплового излучения окружающих тел.

Излучатель, который мы принимаем за АЧТ, отдает энергии: ($S\sigma T^4$) – на излучение и $P=\beta(T-T_0)$ – на теплопроводность нитей с температурами T и T_0 на концах.

В стационарном режиме, когда температура излучателя постоянна, имеем равные встречные энергетические потоки:

$$IU + P_1 = S\sigma T^4 + \beta(T - T_0). \quad (6)$$

В уравнении (6) основными являются слагаемые IU и $S\sigma T^4$, а остальные – поправки, вклад которых падает с ростом температуры.

В отсутствие тока ($I = 0$) температура излучателя – комнатная ($T = T_0 = 295$ К). При этом из формулы (6) следует: $P_1 = S\sigma T_0^4$. Подставляя это выражение в (6) и производя перестановки, получаем:

$$IU - \beta(T - T_0) = S\sigma(T^4 - T_0^4). \quad (7)$$

Коэффициент пропорциональности β рассчитан из уравнения теплопроводности: $\beta = 0,0135$ мВт/К.

Подстановкой в (7) числовых значений для β и T_0 , получаем *рабочую формулу* для анализа результатов измерений:

$$IU - 0,0135 (T - 295) = S\sigma(T^4 - 295^4). \quad (8)$$

Единицы измерений в формуле (8): I – мА, U – В, S – м², σ – мВт·м⁻²·К⁻⁴.

Итак, подведем итоги. Измерив I и U , находят сопротивление ($R = U/I$) и температуру T излучателя (см. формулу (5)). Строят графическую зависимость величины $IU - 0,0135(T - 295)$ (в мВт) от $(T^4 - 295^4)$. Если на построенном графике экспериментальные точки хорошо совпадают с прямой линией, проведенной через начало координат, то полученные данные подтверждают закон С-Б, а именно: поток излучения пропорционален T^4 . Из наклона прямой на графике находят постоянную Стефана-Больцмана σ . Используя полученное значение σ и известные значения других констант, находят постоянную Планка h по формуле (4).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Задание 1. Ознакомиться с установкой

Установка, электрическая схема которой приведена на рис. 3, состоит



Рис. 4. Блок излучателя.

из блока излучателя с лампой и кнопкой «вкл. тока» (рис. 4), источника тока и двух мультиметров. Источник тока и один из мультиметров смонтированы на лабораторном столе.



Рис. 5. Источник тока для нагревания излучателя.

Для нагревания излучателя постоянным током переключатель «Dc-AC» источника устанавливают в положение «Dc». Выходное напряжение, поступающее на гнезда «0...250V», изменяют от нуля до 250 В вращением ручки «U» (см. рис. 5). Ток излучателя измеряют мультиметром, встроенным в рабочий стол. Для этого соответствующие кабели должны быть подключены к гнездам «mA» и «com», а поворотный переключатель режимов измерений установлен в положение «40 mA». Напряжение на излучателе измеряют другим мультиметром в режиме «измерение напряжения постоянного тока до 20 В».

Задание 2. Выполнить измерения

(1) Записать в табл. 1 параметры излучателя, приведенные в блоке излучателя.

Излучатель № ...	Таблица 1
$B = \dots$ К	$A = \dots$ Ом

(2) Подготовить таблицу 2. Таблица 2

I	U	R=U/I	T, К	T ⁴ -295 ⁴	IU - 0,0135 (T-295)
mA	В	Ом	см. ф-лу (5)	К ⁴	мВт

Примечание: в таблице 7 строк для записи результатов измерений.

(3) Мультиметр для измерения тока включить в положение «постоянный ток до 40 мА», мультиметр для измерения напряжения – «постоянное напряжение до 20 В». Регулятор напряжения «U» повернуть на минимум.

(4) Включить питание источника тока и мультиметров.

(5) В работе требуется изучить для излучателя зависимость напряжения U от силы тока I в интервале от 1,5 до 10 мА с шагом примерно 1,5 мА.

Для этого нажать и удерживать кнопку «вкл. тока» в блоке излучателя. Поворачивая ручку «U» источника тока, установить необходимый ток. Тепловое равновесие излучателя установится примерно через 20 с, когда можно произвести измерения тока и напряжения. Результаты измерений записать в таблицу 2.

(6) Выключить питание источника тока и мультиметров.

Задание 3. Обработать результаты измерений и сделать выводы

(1) Выполнить расчеты физических величин, приведенных в табл. 2.

(2) По результатам измерений построить графическую зависимость величины $[IU - 0,0135(T - 295)]$ (в мВт) от $(T^4 - 295^4)$. Нанести на график экспериментальные данные хорошо видимыми значками. Затем провести прямую линию, проходящую через точки наилучшим образом, а также через начало координат.

(3) Сделать вывод о степени согласия полученных результатов с законом С-Б.

(4) Найти значение постоянной С-Б σ , используя результаты измерений и формулу (8) в виде:

$$\sigma = [IU - 0,0135 (T-295)] / S (T^4 - 295^4). \quad (9)$$

Численные значения величин в числителе и знаменателе формулы (9) найти, используя построенный график: этим величинам соответствует любая точка на проведенной прямой. Площадь излучателя $S = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Полученное значение σ записать в табл. 3.

Таблица 3

Результаты работы:	Справочные значения:
$\sigma =$	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$
$h =$	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

(5) Полученное значение σ сравнить с табличным. Сделать выводы.

(6) Используя полученное значение σ и табличные значения других констант, вычислить по ф-ле (4) постоянную Планка. Результат записать в табл. 3 и сравнить с табличным значением, сделать выводы.

(7) Случайная погрешность измерения площади S излучателя $\approx 15\%$. Это приводит к такой же погрешности для постоянной σ , и к меньшей погрешности (почему?) для постоянной Планка. Возможны также систематические погрешности, например, вследствие натекания воздуха в лампу; *вопрос*: как это изменит полученное значение σ ?

Задание 4. Рассчитать максимальную температуру на Луне

Найти температуру на поверхности Луны в местах, где в полдень солнечные лучи падают отвесно. Это задача на применение закона С-Б. Составьте уравнение баланса для участка поверхности: поглощаемую солнечную энергию приравняйте энергии теплового излучения поверхности. Солнце излучает как АЧТ, а Луну считать серым телом. Доведите задачу до числа, принимая: температура Солнца 5800 К, радиус Солнца $7 \cdot 10^5 \text{ км}$, расстояние между Солнцем и Луной $1,5 \cdot 10^8 \text{ км}$. Приведите в отчете вывод

формулы, полученное числовое значение, а также для сравнения литературные данные.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Перед выполнением работы получите инструктаж у инженера лаборатории.
2. Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории «Физика».

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой физический смысл имеет уравнение (6)?
2. Какова мощность теплового излучения кусочка угля площади поверхности 100 см^2 при температуре $727 \text{ }^\circ\text{C}$?
3. Окружающие нас тела испускают электромагнитное тепловое излучение. На какой длине волны излучение наиболее интенсивное (в отсутствие солнечного света), если принять температуру $17 \text{ }^\circ\text{C}$? Какое место эта длина волны занимает на шкале электромагнитных волн?
4. Используемая в работе лампа имеет особую вольт-амперную характеристику: при возрастании тока в десять раз напряжение почти не изменяется. Как объяснить такую характеристику? Для решения какой электротехнической задачи можно применить такую лампу?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. Квантовая физика: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. – 496 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. В 3-х т. М.: Высшая школа, 1979. Т.3.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х т. М.: Наука, 1979. Т.3.

4. Фетисов И.Н. Нагреваемый током терморезистор как излучатель и термометр при изучении закона Стефана-Больцмана // Физическое образование в вузах. Т. 25, №2,2019, с.26-34.

