

Б
Ф-451
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

И. Н. ФЕТИСОВ

Утверждены
редсоветом МВТУ

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА**

Методические указания к лабораторной работе 0-40
по курсу общей физики

Под редакцией И. В. Кириллова

В
Ф-457

Цель работы - ознакомление с законами теплового излучения, экспериментальное изучение закона Стефана-Больцмана, определение постоянных Стефана-Больцмана и Планка.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Тепловое излучение представляет собой электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии (в отличие, например, от люминесценции, которая возбуждается внешними источниками энергии). Тепловое излучение имеет сплошной спектр, положение максимума которого зависит от температуры вещества. С повышением температуры возрастает общая энергия испускаемого излучения, а максимум перемещается в область малых длин волн.

При взаимодействии потока излучения с поверхностью тела поток может разделиться на три части - отраженную, поглощенную и прошедшую сквозь тело, если оно прозрачно.

Поглощательная способность $\alpha(\lambda, T)$ тела - отношение поглощаемого телом потока излучения к падающему на него монохроматическому потоку излучения с длиной волны λ . Поглощательная способность зависит от вещества, длины волны λ и абсолютной температуры тела T . Если в некотором диапазоне длин волн и температур $\alpha(\lambda, T) = 1$, говорят, что тело при этих условиях является абсолютно черным телом (АЧТ). Наиболее близким приближением к АЧТ является небольшое отверстие в непрозрачном сосуде, стенки которого имеют одинаковую температуру (рис. 1). Близкой к единице поглощательной способностью обладают сажа, платиновая чернь и другие вещества.

Испускательная способность $\epsilon(\lambda, T)$ тела - отношение потока излучения, испускаемого телом с единицы площади в полусферу в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, к ширине интервала $d\lambda$. Испускательная способность зависит от вещества, λ и T . Единицей измерения ϵ в СИ является Вт/м²·м.

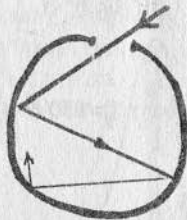


Рис. 1

Полная испускательная способность μ тела*

* В пособии используются обозначения по ГОСТу. В литературе встречаются другие обозначения, например R вместо μ .



вский поток излучения, испускаемого телом с единицы поверхности в полусферу на всех длинах волн

$$u = \int_0^{\infty} \epsilon(\lambda, T) d\lambda \quad (1)$$

Величина u зависит от вещества и его температуры; например, для вольфрама $u = 2,5 \cdot 10^5$ Вт/м² при $T = 2000$ К.

Тепловое излучение может находиться в термодинамическом равновесии с веществом. В этом случае оно называется равновесным излучением. Примером равновесного излучения служит излучение АЧТ. Спектр равновесного излучения не зависит от природы вещества и определяется законом излучения Планка. Рассмотрим основные законы теплового излучения [1, 2].

1. Закон Кирхгофа: отношение испускательной способности $\epsilon(\lambda, T)$ тела к его поглощательной способности $\alpha(\lambda, T)$ не зависит от природы излучающего тела, равно испускательной способности $\epsilon_0(\lambda, T)$ абсолютно черного тела и зависит от длины волны излучения и абсолютной температуры

$$\epsilon(\lambda, T) / \alpha(\lambda, T) = \epsilon_0(\lambda, T) \quad (2)$$

Согласно (2) тело, которое при данной температуре лучше поглощает излучение, должно интенсивнее излучать.

2. Закон излучения Планка: испускательная способность АЧТ как функция длины волны и температуры равна

$$\epsilon_0(\lambda, T) = \frac{2\pi^5 h c^2}{15} \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda T} - 1} \quad (3)$$

где h - постоянная Планка, c - скорость света, K - постоянная Больцмана. На рис. 2 показаны спектры излучения АЧТ, рассчитанные по формуле (3).

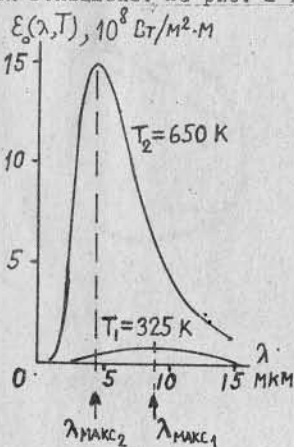


Рис. 2

Из формулы Планка (3) следует ряд других законов теплового излучения, открытых раньше закона Планка; два из них приведены ниже.

3. Закон смещения Вина: длина волны $\lambda_{\text{макс}}$, которой соответствует максимальная испускательная способность АЧТ при данной температуре T , обратно пропорциональна T

$$\lambda_{\text{макс}} T = \beta, \quad (4)$$

где β - постоянная Вина. На рис. 2 видно, что при увеличении температуры в 2 раза максимум спектра сдвигается

и $\lambda_{\text{макс}}$ уменьшается в 2 раза. Этот закон может быть выведен (см. [2]) путем дифференцирования формулы (3) по λ и приравнивания производной нулю, в результате чего получается выражение $\lambda_{\text{макс}} T = \frac{hc}{4,965 K} = \beta = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К.

4. Закон Стефана-Больцмана: полная испускательная способность АЧТ прямо пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры

$$u_0 = \sigma T^4 \quad (5)$$

Фундаментальная физическая константа σ называется постоянной Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$). В соответствии с формулами (1) и (5) площади под кривыми на рис. 2 относятся в $(\frac{T_2}{T_1})^4 = 2^4 = 16$ раз.

Закон (5) может быть получен интегрированием формулы Планка (3) для трех спектральных интервалов

$$u_0 = \int_0^{\infty} \epsilon_0(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi^5 K^4}{15c^2 h^3} \cdot T^4 = \sigma T^4, \quad (6)$$

где

$$\sigma = \frac{2\pi^5 K^4}{15c^2 h^3} \quad (7)$$

Вывод формулы (7) приведен в [1, 2].

При выводе формулы (3) Планк сделал очень важное предположение о том, что атомы и молекулы вещества испускают и поглощают энергию поля не непрерывно, а определенными порциями (квантами)

$$\mathcal{E} = h\nu, \quad (8)$$

где $\nu = c/\lambda$ частота излучения, h коэффициент пропорциональности \mathcal{E} называется постоянной Планка. Она является фундаментальной физической константой и играет большую роль в атомных явлениях. Используя формулу (7), выразим h через другие постоянные

$$h = \pi K \left(\frac{2\pi^2 K}{15c^2 \sigma} \right)^{1/3}, \quad (9)$$

где $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Численное значение h впервые было получено Планком по формуле (9). Таким же способом поступим в данной работе, измерив σ и используя известные значения K и c .

Поверхности реальных тел не являются абсолютно черными, для них $\alpha(\lambda, T) < 1$. В согласии с законом Кирхгофа они меньше излучают, чем АЧТ при одинаковой температуре. Для реальных

Закон Стефана-Больцмана запишем в виде

$$\epsilon = \epsilon_T \sigma T^4, \quad (10)$$

где безразмерный множитель $\epsilon_T < 1$ называется интегральной степенью черноты. Для металлов значения ϵ_T невелики (0,02...0,5) и сильно зависят от качества поверхности: у окисленных, грязных и неполированных поверхностей ϵ_T значительно выше, чем у очищенных и полированных [3]. У многих неметаллов значение ϵ_T близко к единице.

Для реальных тел значение ϵ_T изменяется, вообще говоря, с температурой. Это значит, что для них зависимость ϵ от T отличается от закона $\epsilon \sim T^4$. Однако для ряда тел $\epsilon_T = const$ в достаточно широком интервале T . Такие тела называются "серыми". Для них выполняется закон $\epsilon \sim T^4$, но испускательная способность меньше, чем АЧТ. Многие неметаллы (например, диэлектрики, окислы) обладают свойствами серых тел и могут быть использованы для изучения законов теплового излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Содержание работы

а) Экспериментальное изучение закона Стефана-Больцмана (5), включающее проверку зависимости полной испускательной способности ϵ_0 черного тела от его абсолютной температуры T и определение численного значения постоянной Стефана-Больцмана σ .

б) Определение постоянной Планка h по формуле (9), используя полученное в данной работе значение σ и известные справочные значения скорости света c и постоянной Больцмана k .

2. Методика измерений и экспериментальная установка

Принципиальная схема установки показана на рис. 4. Главным элементом является терморезистор (термистор). Он представляет собой миниатюрный стержень, изготовленный из полупроводникового материала (окислов металлов) и заключенный в стеклянный баллон, из которого откачан воздух. Тонкими металлическими нитями полупроводник подсоединяется к токонесущим стержням (схематично устройство показано на рис. 4 слева).

В данной работе термистор выполняет три основные функции - нагревателя, излучателя и термометра. Через термистор пропускают электрический ток, выделяющееся джоулево тепло почти полностью

затрачивается на тепловое излучение. В рабочем интервале температур характеристики термистора достаточно близки к АЧТ. Температура термистора определяется по его сопротивлению с помощью градуировочной зависимости. Сильная зависимость сопротивления полупроводника от T облегчает измерение его температуры.

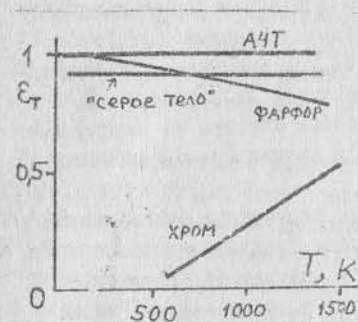


Рис. 3

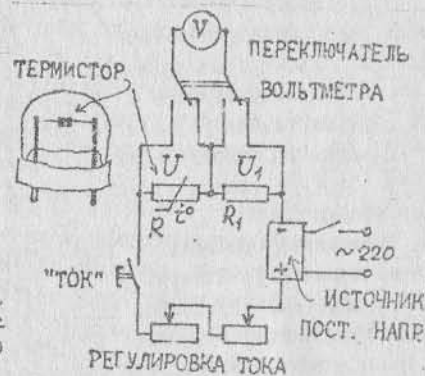


Рис. 4

В термисторе через короткий промежуток времени после включения или изменения тока устанавливается стационарный тепловой режим, описываемый уравнением теплового баланса (в единицах мощности):

$$UI + \sigma S T_0^4 = \sigma S T^4 + P, \quad (11)$$

где U и I - напряжение и ток термистора; S - площадь поверхности термистора (излучателя); $T_0 = 295^{\circ} K$ - комнатная температура; P - потери на теплопроводность нитей и разреженного газа.

Формула (11) выражает закон сохранения энергии: в левой части записано поступление энергии к термистору: джоулево тепло UI и тепловое излучение $\sigma S T_0^4$ окружающих тел с температурой T_0 ; в правой части - потери энергии термистором на излучение $\sigma S T^4$ и теплопроводность P .

Слагаемое $\sigma S T_0^4$ нуждается в пояснении. Пусть ток выключен, тогда температура термистора равна T_0 , джоулево тепло и теплопроводность равны нулю. Уравнение (11) принимает вид $\sigma S T_0^4 = \sigma S T_0^4$, где в правой части записан поток излучения термистора при температуре T_0 , а в левой - равный ему поглощенный тер-

исторо: поток излучения, испускаемого окружающими телами.

В условиях данного опыта вторые слагаемые в (II) являются существенно небольшими поправками.

Теплопроводность нитей и разреженного газа приводит к потерям тепла термистором, величина которых пропорциональна разности температур $T - T_0$.

$$P = \beta(T - T_0). \quad (12)$$

Коэффициент пропорциональности β измерен в отдельном опыте и приведен в паспортных данных лабораторной установки.

С помощью вольтметра V измеряются как напряжение на термисторе U , так и ток I в нем по напряжению U_1 на резисторе R_1 :

$$I = U_1 / R_1. \quad \text{Сопротивление } R \text{ термистора находим по закону Ома:}$$

$$R = \frac{U}{I} = R_1 \frac{U}{U_1} \quad (\text{сопротивлением нитей и других проводников можно пренебречь}).$$

Значение R зависит от температуры термистора (уменьшается с увеличением T). Измерив R , с помощью градуировочной зависимости $T = f(R)$ определяем температуру излучателя. (Для градуировки термистор помещался в термостат и для различных значений температуры в термостате измерялось сопротивление термистора с помощью омметра. При этом ток в термисторе был настолько слабый, что температура термистора практически не отличалась от температуры в термостате. Однако градуировка весьма трудоемка, поэтому студенты ее не выполняют.)

Преобразуем формулу (II) к следующему виду:

$$UI - P = S\sigma(T^4 - T_0^4). \quad (13)$$

В данной работе формула (13) проверяется экспериментально. По результатам измерений строится график зависимости $UI - P$ от $T^4 - T_0^4$, показанный на рис. 5. Если полученные данные в согласии с (13) удовлетворяют линейной зависимости, проходящей через ноль, то это служит подтверждением закона Стефана-Больцмана (5): поток теплового излучения пропорционален T^4 .

Численное значение постоянной σ определяется из наклона прямой на рис. 5. Из формулы (13) получаем

$$\sigma = \frac{1}{S} \cdot \frac{UI - P}{T^4 - T_0^4} = \frac{a}{S}, \quad (14)$$

где $a = \Delta y / \Delta x$ (см. рис. 5). При вычислении a необходимо выразить Δy в ваттах, а Δx - в градусах в четвертой степени.

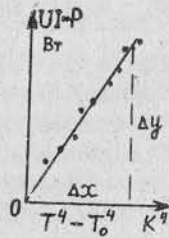


Рис. 5

Площадь S поверхности термистора определена в результате измерений с помощью микроскопа его длины и диаметра и приведена в паспорте установки.

3. Выполнение эксперимента

1. Ознакомиться с установкой. Записать в тетрадь номер лабораторного макета и его характеристики, приведенные в паспорте (под стеклом на панели установки).

2. Включить тумблеры "сеть" установки и вольтметра.

3. Рассмотреть и зарисовать устройство термистора, пользуясь лупой с 5-кратным увеличением, смонтированной в корпус установки.

4. Снять зависимость напряжения U от тока I термистора. Для этого нажать кнопку "ток", при этом замыкается цепь питания термистора (и одновременно выключается лампочка, с помощью которой рассматривался термистор). Установить "переключатель вольтметра" в положение " U_1 " и, пользуясь ручками "регулировка тока" (грубо и точно), установить по вольтметру необходимое значение U_1 и записать результат измерения в таблицу. Затем, не меняя регулировку тока, установить "переключатель вольтметра" в положение " U " и результат измерения U записать в таблицу.

Примечания: а) После нажатия кнопки "ток" или регулировки тока необходимо выждать 10...20 с, чтобы установился стационарный тепловой режим термистора, о чем свидетельствует постоянство значений U и U_1 .

б) Кнопку "ток" можно отпустить несколько раз на протяжении всей серии измерений.

в) При максимальном токе термистор испускает слабое красное свечение.

г) При использовании стрелочного вольтметра следует тщательно считать его показания; для цифрового вольтметра можно ограничиться считыванием трех значащих цифр, например, 5, 71 В.

| U_1 | U | $R = R_1 \frac{U}{U_1}$ | T | $I = \frac{U_1}{R_1}$ | $UI = \frac{UU_1}{R_1}$ | $T - T_0 = T - 295 = \beta(T - T_0)$ | $P = T^4 - 295^4$ | $UI - P$ |
|-------|-----|-------------------------|-----|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------|
| В | В | Ом | К | А | Вт | К | Вт | Вт |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

5. Измерения п. 4 повторить, изменяя напряжение U_1 в пределах в с. изгом, указанными в паспорте.
6. Выключить тумблеры "сеть" установки и вольтметра и приступить к выполнению п.п. 7 и 8.
7. Для каждой пары значений U_1 и U вычислить R и записать в таблицу.
8. Для каждого значения R определить температуру T , пользуясь графиком на панели данной установки.

4. Обработка и анализ результатов измерений

1. Выполнить вычисления и занести результаты в таблицу.
2. Построить на миллиметровой бумаге график зависимости $UI - R$ от $T^4 - 295^4$. Через экспериментальные точки, изображенные отчетливо на графике, в начало координат провести прямую, чтобы отклонения точек от прямой были наименьшими (рис. 5).
3. Сделать вывод о том, согласуются ли полученные данные с линейной зависимостью (13), которая следует из закона Стефана-Больцмана.
4. Определить численное значение постоянной σ , используя построенный график и формулу (14).
5. Определить численное значение постоянной Планка по формуле (9), используя полученное значение σ и известные значения других констант.
6. Проанализировать погрешности измерений.

Наиболее существенные систематические погрешности возникают потому, что термистор хотя и близок к абсолютно черному телу, все же не является в полной мере таковым. Это может вызвать небольшое систематическое занижение σ (~ 10...15%) и небольшое систематическое отклонение точек от прямой на рис. 5.

Случайные погрешности вызываются многочисленными причинами. Пользуясь правилами оценки погрешности косвенных измерений (см. таблицу 6 в пособии [4]), запишем:

$$(\Delta\sigma/\sigma)^2 = (\Delta S/S)^2 + (\Delta a/a)^2, \quad (15)$$

где $\Delta\sigma$, ΔS и Δa - средние квадратические погрешности постоянной Стефана-Больцмана σ , площади излучателя S и наклона a прямой на рис. 5. В условиях данной работы второе слагаемое в (15) мало и им можно пренебречь. Тогда получим

$$\Delta\sigma/\sigma = \Delta S/S. \quad (16)$$

Относительная погрешность измерения постоянной Планка

$\Delta h/h$ в данной работе зависит только от погрешности измерения постоянной Стефана-Больцмана, так как значения S и K , входящие в (9), известны с высокой точностью:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{1}{3} \frac{\Delta\sigma}{\sigma}. \quad (17)$$

В пособии [4, с. 18] разъясняется, каким образом можно получить формулу (17) из (9).

7. Вычислить погрешности $\Delta\sigma$ и Δh по формулам (16) и (17). Результаты измерений представить в виде $\sigma \pm \Delta\sigma$ и $h \pm \Delta h$ с указанием единиц измерения.

8. Полученные значения σ и h сравнить с наилучшими известными в настоящее время: $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с и $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴). Сделать вывод о том, согласуются ли полученные значения h и σ с учетом погрешностей измерения с приведенными значениями.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные законы теплового излучения.
2. Что такое полная излучательная способность и как зависит она от температуры?
3. Каково физическое содержание постоянных σ и h ?
4. Как связаны между собой h и σ ?
5. В чем состоит методика проверки закона (5) в данной работе?
6. Поясните уравнение (II) теплового баланса.
7. Назовите источники погрешностей измерения σ и h .

Литература

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики, т. 3. - М.: Высшая школа, 1979.
2. Савельев И.В. Курс общей физики, т. 3. - М.: Наука, 1979.
3. Криксунов Д.В. Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Сов. радио, 1978.
4. Савельева А.И., Фетисов И.Н. Обработка результатов измерений при проведении физического эксперимента. метод указания к лаб. работе М-1а по курсу общей физики. - М.: МВТУ, 1984.

