

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ФОРМУЛЫ ПЛАНКА ДЛЯ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методические указания к лабораторному практикуму по курсу «Атомная физика» для студентов дневной формы обучения физико-технологического института

Екатеринбург 2016

Методические указания предназначены для использования студентами при подготовке к лабораторному практикуму «Экспериментальное подтверждение формулы Планка для теплового излучения» в рамках курса «Атомная физика». Они содержат описание лабораторной работы, посвященной экспериментальному подтверждению важнейших закономерностей теплового излучения. В них представлены основы теории теплового излучения, приведены порядок выполнения работы и контрольные вопросы для самоподготовки.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Основные понятия и определения в теории теплового излучения
2. Законы излучения абсолютно черного тела
3. Описание лабораторной установки
4. Порядок выполнения лабораторной работы
5. Содержание отчета
6. Перечень контрольных вопросов к коллоквиуму

Библиографический список

Введение

Данные методические указания предназначены для студентов физических специальностей физико-технологического института, изучающих основные закономерности равновесного теплового излучения в лабораторном практикуме «Атомная физика».

Тепловое излучение испускается всеми телами при любых температурах, отличных от абсолютного нуля. Это излучение заполняет все пространство между телами, поэтому при решении многих практических задач необходимо учитывать его влияние на физические величины, характеризующие различные свойства веществ и происходящие в них процессы и явления.

Законы равновесного теплового излучения имеют особенно простую форму для излучения абсолютно черного тела (АЧТ). При теоретическом объяснении этих законов была введена фундаментальная гипотеза квантов энергии, лежащая в основе современной квантовой физики.

В начале методических указаний дано краткое теоретическое изложение законов излучения АЧТ. Далее следуют подробные методические рекомендации по опытной проверке формулы Планка. Особое внимание в работе обращено на тщательную обработку экспериментальных данных. Необходимость в этом обусловлена следующим.

Во-первых, в работе в качестве излучателя используется не АЧТ, а вольфрамовая спираль галогеновой лампы. Спираль отличается от АЧТ своими спектральными характеристиками.

Во-вторых, спектр излучения вольфрама измеряется не идеальным анализатором, а фотоэлементом, имеющим «красную границу» за счет не нулевой работы выхода.

Цель работы: экспериментально проверить формулу Планка и ознакомиться с законами Кирхгофа, Стефана-Больцмана и законом смещения Вина. Закрепить ознакомление измерением излучательной способности

реального тела, нагретого до разных температур. Обработать результаты с учетом реальных факторов спектрального эксперимента и сравнить полученные результаты с теоретической кривой, рассчитанной по формуле Планка для испускательной способности АЧТ.

1. Основные понятия и определения в теории теплового излучения

Колебание заряженных частиц, входящих в состав вещества, вызывает излучение электромагнитных волн. Электромагнитное излучение сопровождается потерей энергии, поэтому для обеспечения дальнейшего излучения необходимо восполнять убывающую энергию. Это восполнение можно осуществлять различными путями. Наиболее распространенным способом компенсации убывающей энергии является нагревание тела. Вид излучения, связанный с таким способом восстановления энергии, называется тепловым или температурным излучением. Тепловое излучение имеет место при любых температурах отличных от 0 К. Причем испускание электромагнитных волн происходит за счет тепловой энергии тела.

Опыт показывает, что тепловое излучение является единственным видом излучения, которое находится в равновесии с испускающим его телом. В самом деле, предположим, что излучающее тело окружено полостью с идеально отражающими стенками, внутри которой создан абсолютный вакуум. Тогда излучение, испускаемое телом, не будет рассеиваться в окружающем пространстве, а будет полностью отражаться стенками полости. Часть отраженной от стенок энергии излучения будет вновь падать на излучающее тело и в той или иной степени им поглощаться и переизлучаться. В результате пространство внутри полости будет заполнено лучистой энергией.

Таким образом, можно представить себе замкнутую систему, состоящую в данном случае из излучающего тела и излучения, находящегося в полости.

Энергия этой системы содержится частично в виде энергии излучения, частично в виде внутренней энергии излучающего тела. Поскольку никаких потерь в системе не происходит, то полная энергия всей системы остается постоянной. Однако между отдельными частями системы будет происходить обмен энергией. При этом, если нагретое тело в единицу времени больше испускает энергии, чем поглощает, то температура его будет понижаться, а это, в свою очередь, приведет к уменьшению испускаемой энергии в единицу времени. Наоборот, если тело каждую секунду больше поглощает падающую на него энергию, содержащуюся в полости излучения, то температура тела будет повышаться, что вызовет увеличение испускаемой телом энергии в единицу времени.

В обоих случаях процессы уменьшения или увеличения температуры тела, а, следовательно, уменьшения или увеличения его внутренней энергии будут происходить до тех пор, пока не будет достигнуто такое состояние, когда помещенное в полость тело каждую секунду будет поглощать и испускать одинаковое количество энергии. Такое состояние системы называется равновесным. Равновесное состояние является устойчивым, поскольку при любом его нарушении оно вновь будет восстановлено в силу описанного выше механизма.

Излучение, возбуждаемое не нагреванием, а какими-либо другими процессами, не будет равновесным. Пусть, например, излучение является результатом какого-либо химического превращения тела. Поглощение телом части испущенной им световой энергии не вернет тело в первоначальное состояние. Более того, повышение температуры тела, вызванное поглощением тепла, обычно ведет лишь к более энергичному протеканию химической реакции и к более интенсивному изменению самого тела. Этот процесс непрерывного изменения излучающей системы будет продолжаться до тех пор, пока может идти химическая реакция. Следовательно, система все больше и больше будет удаляться от первоначального состояния. Равновесное состояние

установится только тогда, когда закончится химический процесс, и характер установившегося излучения будет определяться температурой тела, то есть равновесное состояние будет соответствовать опять-таки тепловому излучению.

Основной величиной, характеризующей тепловое состояние тела, является его температура T . Из опытных данных следует, что тела, нагретые до разной температуры и способные передавать друг другу тепло, по истечении некоторого времени принимают одинаковую температуру, т.е. приходят в тепловое равновесие. Это явление наблюдается даже в том случае, когда исключена возможность теплового обмена посредством теплопроводности или конвекции. Тепловое равновесие имеет динамический характер. Это означает, что при одинаковых температурах рассматриваемых тел между ними непрерывно происходит обмен энергией, и этот процесс осуществляется таким образом, что в единицу времени каждое тело столько же излучает тепла, сколько поглощает. Отсюда ясно, что, например, два тела обладают различной способностью к поглощению, то их способность к испусканию не может быть одинаковой. При этом тело, способное поглотить большее количество энергии, должно в большей степени ее излучать.

Для установления количественных закономерностей теплового излучения существенными являются понятия энергетического потока, испускательной и поглощательной способностей тела. Под энергетическим потоком Φ понимают количество энергии W , испускаемой телом по всем направлениям (в пределах телесного угла 2π) за единицу времени t :

$$\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (1.1)$$

при этом промежуток времени Δt должен быть с одной стороны достаточно малым для того, чтобы отслеживать сравнительно медленные процессы изменения во времени мощности электромагнитного излучения, испускаемой телом. С другой стороны он должен быть много больше характерного времени, соответствующего периоду электромагнитных волн, испускаемых телом.

Энергетическая светимость или интегральная испускательная способность E_T равна потоку энергии излучения Φ , испускаемому единицей поверхности тела S во всем спектральном диапазоне:

$$E_T = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.2)$$

Из опытных данных следует, что E_T в сильной степени зависит от температуры T излучающего тела.

Более детальную информацию о характере излучения дает спектральная испускательная способность, определяющая распределение излучения по частотам - $e(\nu, T)$, по длинам волн — $e(\lambda, T)$, или по какой-либо другой характеристике, связанной с ними. По определению:

$$e(\nu, T) = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial S \partial \nu} \quad (1.3a)$$

$$e(\lambda, T) = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial S \partial \lambda} \quad (1.3b)$$

Физический смысл этих величин состоит в том, что они определяют

мощность, испускаемую единицей площади тела в единичном частотном интервале, либо в единичном интервале длин волн, соответственно. Зависимость испускательной способности $e(\nu, T)$ от частоты ν приведена на рис.1.1. Зная спектральную испускательную способность $e(\nu, T)$, можно легко вычислить энергетическую светимость E_T :

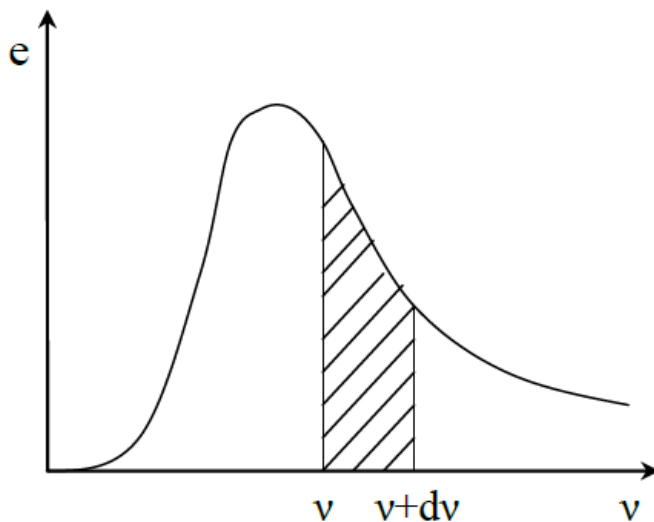


Рис.1.1. Испускательная способность тела

$$E_T = \int_0^{\infty} e(\nu, T) d\nu \quad (1.4)$$

Если на единицу поверхности тела в интервале частот $d\nu$ падает поток

энергии $d\Phi$, то часть этого потока $d\Phi'$ будет поглощаться телом. Поглощательной способностью тела a называется отношение:

$$a = \frac{d\Phi'}{d\Phi} \quad (1.5)$$

Опыт показывает, что поглощательная способность тел есть функция частоты ν и температуры T : $a(\nu, T)$, и всегда меньше или равна единице. Среди большого многообразия различных тел можно представить себе такое, поглощательная способность которого максимальна, т.е. $a(\nu, T) = a(\lambda, T) = 1$, для всех частот и температур. Такое тело называется абсолютно черным. Если АЧТ находится в тепловом равновесии с другими (не абсолютно черными) телами, то, очевидно, каждую секунду с единицы поверхности этого тела будет излучаться энергии больше, чем у любого другого тела. Другими словами, испускательная способность АЧТ при некоторой температуре T и частоте ν всегда больше, чем испускательные способности других тел при тех же T и ν .

2. Законы излучения абсолютно черного тела

Закон Кирхгофа, согласно которому отношение испускательной способности тела $e(\nu, T)$ к его поглощательной способности $a(\nu, T)$ есть универсальная для всех тел функция частоты и температуры:

$$\frac{e(\nu, T)}{a(\nu, T)} = f(\nu, T) \quad (2.1)$$

ставит в центр внимания теории теплового излучения функцию $\varepsilon(\nu, T)$, представляющую собой испускательную способность АЧТ. Так как для АЧТ $a(\nu, T) = 1$, то $f(\nu, T) = \varepsilon(\nu, T)$ – это спектральная испускательная способность АЧТ. Впервые точный вид этой функции, справедливый как в низкочастотной, так и в высокочастотной области спектра, был теоретически установлен Максом Планком. Согласно Планку, функция $\varepsilon(\nu, T)$ имеет вид:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (2.2)$$

$h = 6.6260755 \cdot 10^{-27}$ эрг·с – постоянная Планка,

$c = 2.99792458 \cdot 10^{10}$ см/с – скорость света в вакууме,

$k = 1.380658 \cdot 10^{-16}$ эрг/К – постоянная Больцмана.

Наряду с излучательной способностью АЧТ $\varepsilon(\nu, T)$ в спектроскопии часто используется величина спектральной объемной плотности энергии $u(\nu, T)$ равновесного излучения. Можно показать, что величины $u(\nu, T)$ и $\varepsilon(\nu, T)$ связаны друг с другом простым соотношением:

$$u(\nu, T) = \frac{4}{c} \varepsilon(\nu, T) \quad (2.3)$$

Открытию Планком вида функции излучения АЧТ $\varepsilon(\nu, T)$ (2.2) предшествовали многочисленные попытки установления вида этой функции, которые хотя и не дали общего решения задачи, позволили найти важные закономерности в теории теплового излучения. Эти закономерности непосредственно вытекают из формулы Планка (2.2).

Одним из первых был сформулирован закон Стефана-Больцмана, устанавливающий зависимость интегральной излучательной способности (энергетической светимости) АЧТ от температуры. Согласно этому закону, интегральная излучательная способность АЧТ пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры, т.е:

$$\varepsilon(T) = \sigma T^4 \quad (2.4)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Подставляя в (1.4) $\varepsilon(\nu, T)$ из (2.2), можно не только доказать справедливость приведенного выше утверждения, но и найти выражение для постоянной σ через универсальные постоянные π , h , c и k . Выполнив интегрирование, получим:

$$\sigma = \frac{2\pi^5}{15} \frac{k^4}{h^3 c^2} = 5.67 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-4} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}.$$

Непосредственными измерениями было получено следующее значение постоянной Стефана-Больцмана: $\sigma = 5.67051 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$.

Отметим еще один закон излучения АЧТ – закон смещения Вина. Функция $\varepsilon(\nu, T)$ обладает максимумом. Если проследить за положением максимумов кривых $\varepsilon(\nu, T)$ при разных температурах, то можно заметить, что с повышением температуры АЧТ их максимумы смещаются в сторону больших частот. При этом отношение частоты ν_m , отвечающей максимальному значению функции $\varepsilon(\nu, T)$ к температуре T , при которой находится АЧТ, для всех температур является постоянной величиной:

$$\frac{\nu_m}{T} = b' \quad (2.5)$$

где $b' = 0.588 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – константа. Доказательство этого закона нетрудно получить, находя условие экстремума функции (2.2).

Из формулы Планка (2.2) следуют формулы излучения Вина:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} e^{-h\nu/kT} \quad (2.6)$$

для области больших частот и Релея-Джинса

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi \nu^2}{c^2} kT \quad (2.7)$$

для области малых частот.

В практической спектроскопии, в том числе и при исследовании теплового излучения, очень часто в качестве одного из аргументов в функции ε

используют не частоту ν , а длину волны $\lambda = \frac{c}{\nu}$ или волновое число $\bar{\nu} = \frac{\nu}{c}$.

При этом формулы (2.2), (2.6), (2.7) принимают иной вид, а константа в законе смещения Вина – другое значение. Формула Планка, в которой в качестве аргументов приняты длина волны λ и температура T :

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (2.8)$$

получается из (2.2) при учете соотношений:

$$|\varepsilon(\lambda, T) d\lambda| = |\varepsilon(\nu, T) d\nu| \quad \text{и} \quad |d\nu| = \frac{c}{\lambda^2} |d\lambda|$$

Теоретическая зависимость $\varepsilon(\lambda, T)$ АЧТ, установленная М. Планком,

показана на рис.2.1 для нескольких температур.

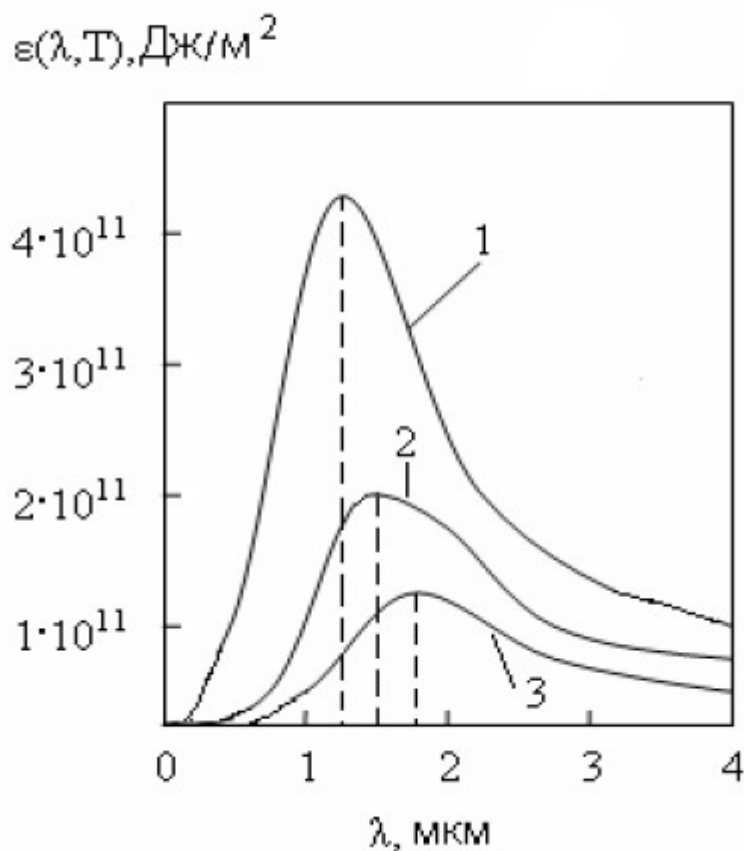


Рис.2.1. Зависимость испускательной способности АЧТ от длины волны для трех различных температур: 1 – 2000 К; 2 – 1700 К; 3 – 1600 К

Исследование соотношения (2.8) на экстремум приводит к закону смещения Вина с соответствующей константой $b = 0.29 \text{ см} \cdot \text{К} = 2898 \text{ мкм} \cdot \text{К}$:

$$\lambda_m T = b \quad (2.9)$$

Как следует из этого соотношения, при комнатной температуре максимум испускательной способности лежит примерно на длине волны 10 мкм, то есть в средней инфракрасной области. С ростом температуры максимум смещается в коротковолновую сторону и при температуре 6000 К уже попадает в середину видимого спектра.

Основываясь на законах теплового излучения, можно определить температуру раскаленных тел. Если излучающее тело является абсолютно

черным или достаточно к нему приближается, то для определения его температуры можно воспользоваться рассмотренными выше законами. По существу, для сильно нагретых тел ($T \geq 2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$) измерения температуры иными способами не особенно достоверны и наиболее надежными является способы, основанные на законах излучения АЧТ.

3. Описание лабораторной установки

Экспериментальное изучение спектра излучения проводится на компьютерной модели лабораторной установки, схема которой приведена на рис.3.1.

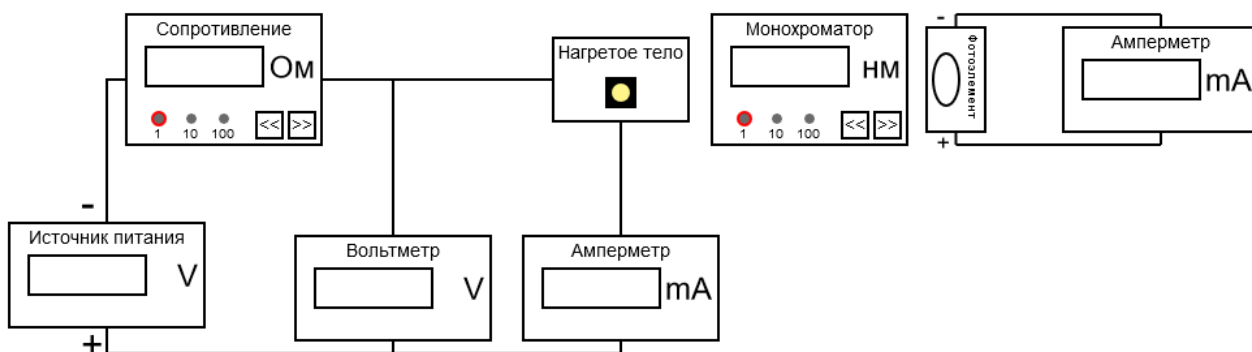


Рис 3.1. Схема лабораторной установки.

Нагретое тело моделирует лампу накаливания, температура спирали в которой меняется за счет изменения сопротивления в электрической цепи. Излучение нагретого тела попадает на вход монохроматора, который выделяет из спектра только одну длину волны. С выхода монохроматора излучение попадает на фотоэлемент, который преобразует энергию падающего излучения в электрический ток. Величина тока пропорциональна испускательной способности нагретого тела.

4. Методика измерения спектров и обработки результатов

В качестве детектора излучения в данной работе используется модель фотоэлемента. Это возможно благодаря первому закону фотоэффекта: «Сила фототока прямо пропорциональна энергетической светимости». Иными словами, при фиксированной частоте падающего на фотоэлемент света, справедливо соотношение:

$$I \sim E_T \quad (4.1)$$

где I – сила тока, которая также пропорциональна интенсивности или обратно пропорциональна квадрату расстояния до излучающего (нагретого) тела:

$$I \sim \frac{1}{r^2} \quad (4.2)$$

Кроме этого, согласно закону Ома:

$$I \sim U \quad (4.3)$$

где U – напряжение на фотоэлементе. Согласно уравнению Эйнштейна для фотоэффекта это напряжение может быть найдено по формуле:

$$U = \frac{\frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}}}{e} \quad (4.4)$$

Таким образом, для силы тока и для энергетической светимости получаем формулы:

$$I \sim E_T \frac{\frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}}}{r^2 e} \quad (4.5)$$

$$E_T = \text{const} \frac{Ir^2 e}{\frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}}} \quad (4.6)$$

Измерив силу тока для всех длин волн спектрального диапазона и вычислив соответствующую энергетическую светимость, получим спектральную испускательную способность нагретого тела $e(\lambda, T)$ при некоторой температуре T . Чтобы из эксперимента получить испускательную способность АЧТ, необходимо поделить полученные значения испускательной

способности реального (серого) тела на его поглотительную способность $a(\nu, T)$. Конкретные значения работы выхода фотоэлемента и поглотительной способности нагретого тела будут показаны на экране во время выполнения лабораторной работы.

5. Порядок выполнения работы

5.1. Меняя сопротивление, установить подводимую к нагретому телу мощность $P_1 = 4$ Вт.

5.2. Меняя длину волны на монохроматоре, выяснить при каких длинах волн наблюдаются ноль и максимум силы тока через фотоэлемент. Записать эти значения длин волн.

5.3. Увеличивая длину волны, найти 5 разных значений силы тока до максимума и 5 разных значений после максимума.

5.4. Занести результаты, полученные в пунктах 5.2 и 5.3 в таблицу.

5.5. Провести аналогичные измерения для двух других величин мощности $P_2 = 5$ Вт, $P_3 = 6$ Вт.

5.6. По измеренным значениям силы тока, вычислить и занести в таблицу спектральную излучательную способность нагретого тела $e(\lambda, T)$. Константу в формуле (4.6) принять равной единице.

5.7. Построить графики трех нормированных зависимостей $e_{\text{норм}}(\lambda, T)$.

5.8. Определить по графикам положения максимумов λ_m кривых $e_{\text{норм}}(\lambda, T)$ и вычислить температуры нагретого тела в соответствии с законом смещения Вина.

5.9. Для температуры T_2 рассчитать по формуле Планка (2.8) зависимость $\varepsilon(\lambda, T_2)$ и отнормировать ее на единицу.

5.10 Построить на отдельном графике нормированную теоретическую $\varepsilon_{\text{норм}}(\lambda, T_2)$ и экспериментальную $e_{\text{норм}}(\lambda, T_2)$ кривые. Объяснить расхождение теоретической кривой с экспериментальной.

5.11. Проверить справедливость соотношения: $\frac{P_1}{T_1^4} = \frac{P_2}{T_2^4} = \frac{P_3}{T_3^4}$

Таблица

N	λ_i , нм	I_i , мА	$e(\lambda, T) = \frac{I_i r^2 e}{\frac{hc}{\lambda} - A_{out}}$	$e_{норм} = \frac{e(\lambda, T)}{e_{max}}$
P ₁				
1				
2				
...				
11				
P ₂				
...
P ₃				
...

6. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

6.1. Цель работы.

6.2. Краткое изложение основных законов теплового излучения.

6.3. Описание лабораторной установки и назначение отдельных блоков.

6.4. Методику проведения измерений.

6.5. Таблицу с первичным экспериментальным материалом для трех мощностей, подводимых к нагретому телу.

6.6. Нормированные на единицу графики $e_{норм}(\lambda, T)$ для трех мощностей и теоретическую кривую для одной мощности.

6.7. Температуры нити накала, вычисленные из закона смещения Вина.

6.8. Величины отношений $\frac{P_1}{T_1^4}, \frac{P_2}{T_2^4}, \frac{P_3}{T_3^4}$

6.9. Выводы по работе.

6. Перечень контрольных вопросов к коллоквиуму

6.1. Какое электромагнитное излучение называется тепловым?

6.2. Как определяется энергетический поток?

6.3. Как определяется энергетическая светимость?

6.4. Каков физический смысл испускательной способности $e(\nu, T) = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial S \partial \nu}$?

6.5. Как совмещаются в формуле Планка для объемной спектральной плотности энергии излучения волновые и квантовые представления?

6.6. Почему в эксперименте измеряют не объемную спектральную плотность излучения, а испускательную способность?

6.7. Каков физический смысл приведенного волнового числа?

6.8. Как от спектральной испускательной способности $\varepsilon(\nu, T)$ перейти к объемной спектральной плотности энергии $u(\nu, T)$?

6.9. Для какого анализа излучения предназначены спектральные приборы?

Библиографический список

1. Шпольский Э.В. Атомная физика, т.1, М.: Наука, 1984, 552с.

2. Добрецов Л.Н. Атомная физика, М.: Физматгиз, 1960, 348с.

3. Лоудон Р. Квантовая теория света. М.: Мир, 1976.

4. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976.

5. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978.