

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методические указания к лабораторной работе 410 по физике для студентов всех
форм обучения всех направлений подготовки

Екатеринбург

2018

УДК 621.791.76(075.8)

Составители: Т.И. Папушина, А.Н.Филанович
Научный редактор: проф., д.ф. – м.н. А.А.Повзнер

Изучение законов теплового излучения. Методические указания к лабораторной работе № 410 по физике/ Папушина Т.И., Филанович А.Н.

Екатеринбург: УрФУ, 2018, 17 с.

Методические указания к лабораторной работе № 410 по курсу «Физика» представляют собой описание экспериментальной установки и ход выполнения работы. В пунктах 1, 2, 3 кратко изложена теория теплового излучения, представлены основные законы.

Подготовлено кафедрой физики.

© “Уральский Федеральный Университет им.
Первого Президента России.Б.Н. Ельцина”, 2018
© Папушина Т.И., Филанович А.Н.,2018

1. Законы теплового излучения черного тела.

Опытным путем было установлено, что нагретые до высоких температур тела начинают светиться, то есть испускать электромагнитные волны видимого диапазона. При более низких температурах излучаются невидимые электромагнитные волны. Волны, испускаемые атомами, которые возбуждаются за счет энергии теплового движения, представляют собой тепловое излучение. Тепловое излучение – единственное излучение, способное находиться в термодинамическом равновесии с веществом. Такое равновесное излучение устанавливается в теплоизолированной системе, все тела которой находятся при одной и той же температуре.

Спектральной характеристикой теплового излучения тела служит спектральная плотность энергетической светимости $r_{\lambda,T}$, равная энергии электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени с единицы площади поверхности тела в единичном интервале длин волн вблизи данной длины волны.

$$r_{\lambda,T} = \frac{\partial^3 W}{\partial \lambda \partial t \partial S} \quad (1)$$

Эта величина характеризует испускательную способность тела.

Спектральной характеристикой поглощения электромагнитных волн телом служит монохроматический коэффициент поглощения $a_{\lambda,T}$, который показывает, какая доля энергии ∂W , падающего на поверхность тела электромагнитного излучения в интервале от λ до $\lambda+d\lambda$ поглощается телом.

$$a_{\lambda,T} = \frac{\partial W_{\text{погл.}}}{\partial W} \quad (2)$$

Из опытов известно, что на спектральную плотность энергетической светимости и коэффициент поглощения влияют частоты ν (или длины волны λ) соответственно излучаемых и поглощаемых волн, температура тела, его химический состав и состояние поверхности.

Тело, которое поглощает всю падающую на него энергию называется черным (абсолютно черным – АЧТ). Это поглощение не зависит от частоты падающих электромагнитных волн, их поляризации и направления распространения. Испускательная и поглощательная способности непрозрачного тела связаны между собой законом Кирхгофа, полученным на основании общих термодинамических представлений. Отношение спектральной плотности энергетической светимости тела к его монохроматическому коэффициенту поглощения не зависит от материала тела и равно спектральной плотности энергетической светимости черного тела, являющейся функцией только температуры и длины волны. В дифференциальной форме этот закон имеет вид:

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T}^0 \quad (3)$$

где $r_{\lambda,T}^0(\lambda,T)$ – функция Кирхгофа. От дифференциальных характеристик теплового излучения можно перейти к интегральным характеристикам. Мощность теплового излучения с единицы площади поверхности тела во всем интервале длин волн от 0 до ∞ , называемая энергетической светимостью R_T , связана с $r_{\lambda,T}$ соотношением

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda. \quad (4)$$

Для абсолютно черного тела:
$$R_T^0 = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T}^0 d\lambda$$

Энергетическая светимость черного тела R_T^0 зависит только от температуры T .

Экспериментально и теоретически были определены законы теплового излучения абсолютно черного тела.

Зависимость энергетической светимости черного тела от температуры определяется законом Стефана – Больцмана:

$$R_T^0 = \sigma T^4, \quad \text{где } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4} \quad (5)$$

Энергия равновесного теплового излучения определенным образом распределена по длинам волн. Координаты максимума этого распределения позволяют определить законы Вина:

$$\lambda_m \cdot T = b, \quad (6)$$

где λ_m – длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости $(r_{\lambda,T}^0)_m$, T – термодинамическая температура, $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина (это закон смещения Вина). Максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости черного тела определяется вторым законом Вина:

$$(r_{\lambda,T}^0)_m = c T^5 \quad (7)$$

где $c = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} / (\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$ – другая постоянная Вина.

Экспериментально полученный график зависимости испускательной способности r_ν^0 абсолютно черного тела от частоты ν представлен на рис.1

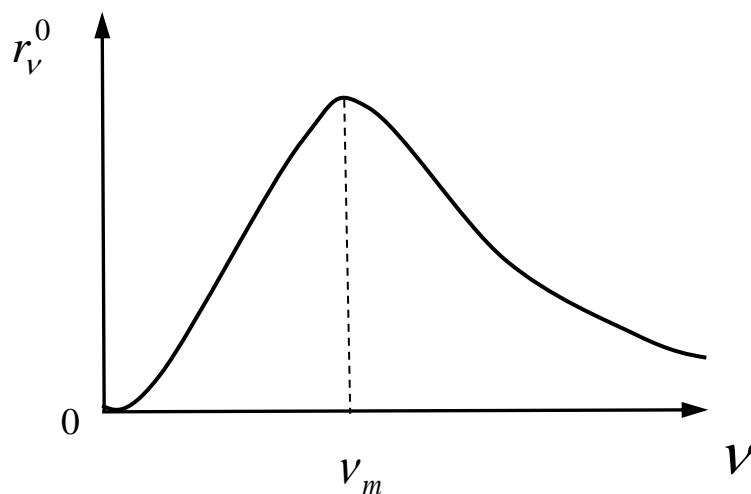


Рис.1. Экспериментальная зависимость испускательной способности АЧТ от частоты

2.Формула Планка

Было несколько попыток теоретически обосновать экспериментальные законы теплового излучения. Получить выражение хорошо согласующееся с экспериментом для функции Кирхгофа и дать теоретическое обоснование спектральным закономерностям черного излучения впервые удалось М.Планку. Излучающую систему он представил в виде совокупности линейных гармонических осцилляторов (электрических диполей) со всевозможными собственными частотами ν , получив зависимость $r_\nu^0(\nu)$, представленную ниже:

$$r_\nu^0 = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle w_\nu \rangle, \quad (8)$$

где $\langle w_\nu \rangle$ - средняя энергия осциллятора с собственной частотой ν .

Используя термодинамические соотношения и выдвинув квантовую гипотезу, согласно которой энергия атомов - осцилляторов может изменяться дискретно, порциями, пропорциональными кванту энергии $h\nu$, где h – постоянная Планка ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж/Гц), Планк получил формулу :

$$r_\nu^0 = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (9)$$

где c – скорость света в вакууме, k – постоянная Больцмана.

График соответствующий формуле Планка полностью совпадает с экспериментальной зависимостью (рис.1).

3.Цель работы

Целью работы является:

1). Экспериментальное подтверждение формулы Планка. Определение постоянной Планка.

Для этого исследуется зависимость интенсивности излучения от температуры на фиксированной частоте. Спектральная интенсивность излучения черного или серого тела пропорциональна спектральной плотности энергии равновесного теплового излучения, определяемой формулой Планка (9).

Интенсивность излучения определяет величину фототока I_{ϕ} , возникающего в результате освещения фотоприемника. Для диапазона частот, изучаемых в данной работе, справедливо соотношение $h\nu \gg kT$, и зависимость фототока от температуры будет иметь вид:

$$I_{\phi} = \text{const} \cdot \exp(-h\nu/kT). \quad (10)$$

Линейная зависимость логарифма фототока $\ln I_{\phi}$ от ν/T должна свидетельствовать о справедливости формулы Планка. Более удобно исследовать зависимость $\ln I_{\phi}$ от $1/T$.

Из коэффициента пропорциональности в этой зависимости определяется постоянная Планка.

2). Проверка закона Стефана-Больцмана.

Справедливость закона Стефана-Больцмана проверяется по графику зависимости мощности излучения P нити накаливания от температуры T ; отношение $\ln P / \ln T$ должно быть близко к 4. За мощность излучения P принимаем мощность электрического нагрева. Сравнивая мощность излучения P с мощностью излучения абсолютно черного тела P° , определяем коэффициент излучения реального тела (нити накаливания).

4.Описание экспериментальной установки.

Принципиальная схема установки и основные узлы приведены на рис.2. (вид сверху). В нижнем правом углу расположен блок источников света 1. Свет от лампы накаливания поступает на зеркало, установленное на поворотной стойке 2 а затем на вход монохроматора 9. Рукояткой 3 зеркало поворачивают вокруг вертикальной оси, а винтом 4 – вокруг горизонтальной оси, добиваясь совмещения изображения источника с входной щелью монохроматора 9.

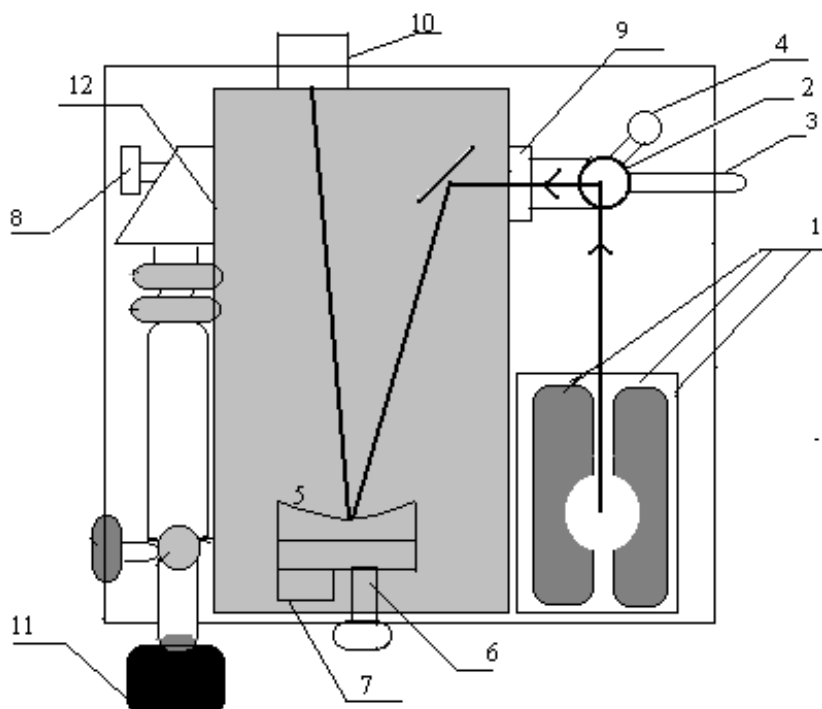


Рис. 2. Основные узлы установки

В монохроматоре свет направляется на сферическую дифракционную решетку 5, поворот которой осуществляется ручкой 6. Длина волны света, отраженного от решетки в направлении выхода, отсчитывается по шкале 7 отсчетного устройства, расположенного на передней стенке монохроматора. Шкала 7 имеет три барабана, показывающих значение длины волны в нанометрах (рис.3). Отсчёт производится при помощи горизонтальной визирной линии. Цена деления правого барабана 0,2 нм.

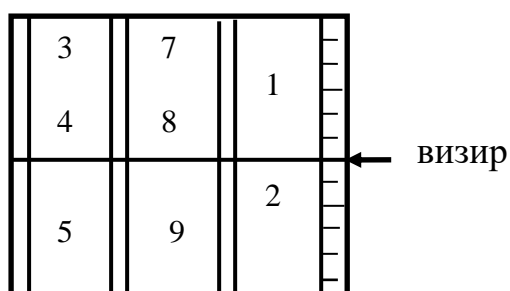


Рис. 3. Шкала монохроматора.

Отсчет по шкале на рис. 3 – 481,6нм.

Монохроматор имеет два выхода: задний выход 10 для установки фотоприемников и боковой выход 12 для визуального наблюдения через окуляр 11. Выбор выхода монохроматора осуществляется с помощью подвижного зеркала, перемещаемого штоком 8. Если шток вдвинут до упора, излучение поступает на боковой выход, если шток выдвинут до упора, излучение поступает на фотоприемник.

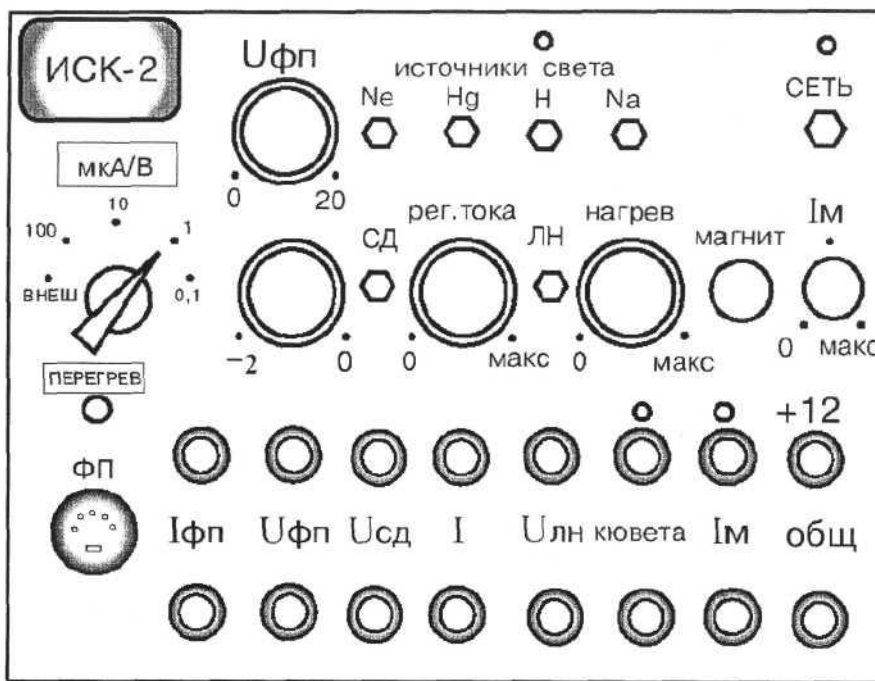


Рис. 4. Лицевая панель установки

На передней стенке установки размещена панель измерительной системы, обеспечивающей питание источников света; задание и измерение токов и напряжений источников света; создание и измерение нужных напряжений на фотоприемнике; измерение токов фотоприемника. Мультиметры, расположенные также на передней стенке установки, в данной работе не используются.

Электрическое сопротивление нити лампы накаливания изменяется по закону:

$$R=R_0(1+\alpha(T-T_0)), \quad (11)$$

где R_0 – значение сопротивления при комнатной температуре T_0 и α – температурный коэффициент сопротивления. Использование этой зависимости позволяет находить температуру нити лампы накаливания, причем в настоящей работе процесс расчета температуры автоматизирован и для определения температуры нити в ходе измерений необходимо только правильно задать R_0 и T_0 .

При выполнении лабораторной работы применяется система сбора данных *NI DAQ* и программа обработки экспериментальных данных, разработанная в среде *NI LabVIEW*. При этом, с использованием четырехканального АЦП *NI USB-9162*, становится возможным одновременное измерение четырех сигналов.

На рис. 5 представлена интерфейс (лицевая панель) программы, с помощью которой осуществляются измерения и их обработка.

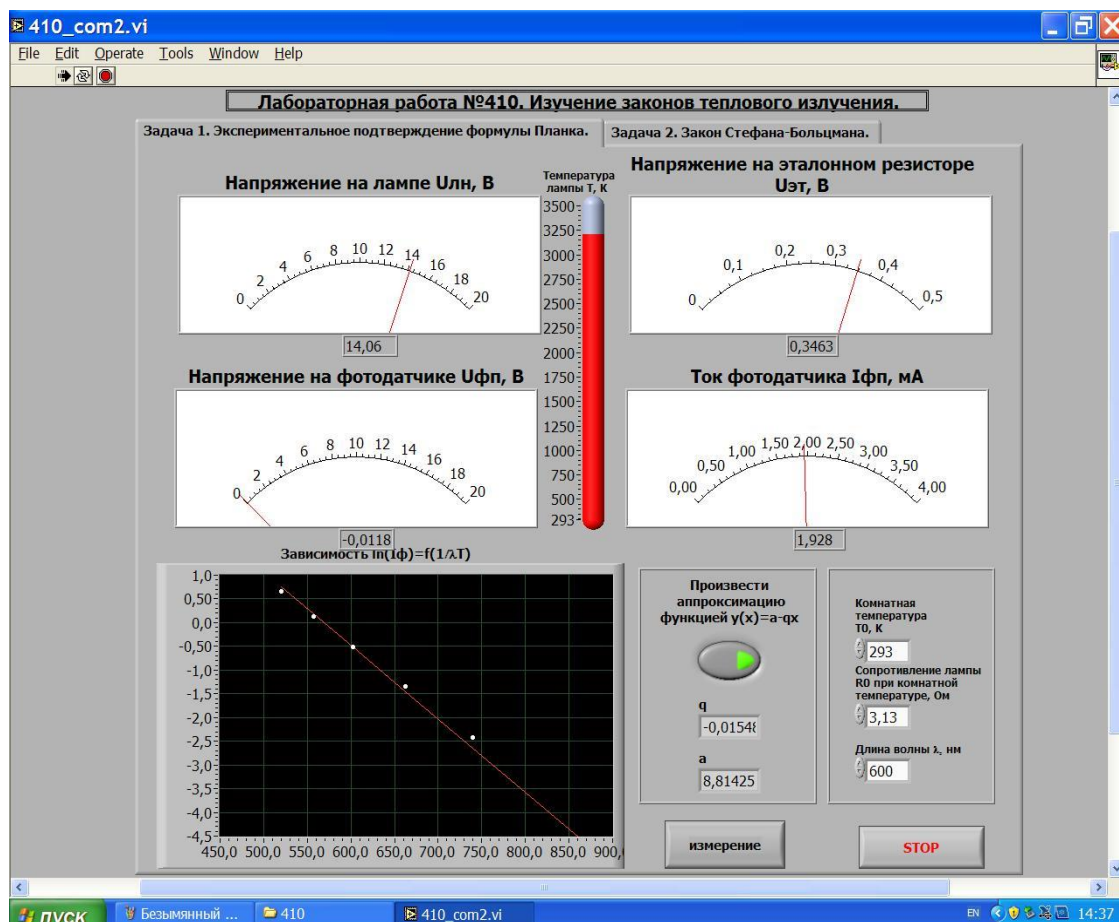


Рис.5 Лицевая панель программы сбора и обработки данных эксперимента

5. Порядок выполнения работы.

Задача 1. Экспериментальное подтверждение формулы Планка.

1. Установите фотоприемник с маркировкой «ФД» (фотодиод) на задний выход 10 монохроматора (рис.1). Корпус приемника надевается на выступающую из монохроматора короткую трубу.

2. Подключите приёмник к выходу усилителя (гнездо «ФП» на передней панели установки, рис. 3).

3. Проводники « $U_{лн}$ » подключите к гнездам « $U_{лн}$ » на передней панели установки.

4. Ручку потенциометра «Рег. тока» поверните в крайнее левое (против часовой стрелки) положение. Включите источник излучения – лампу накаливания ЛН (тумблер ЛН).

5. Измерьте сопротивление лампы при комнатной температуре. Для этого меняя напряжение на лампе $U_{лн}$ в пределах до 0,05 В, измерьте напряжение $U_{эт}$ на эталонном резисторе (сопротивление эталонного резистора составляет $R_{эт}=1$ Ом)

для 6 различных значений напряжения на лампе. Результаты измерений занесите в табл. П. 2 отчета. Сопротивление лампы рассчитывается по формуле:

$$R=R_{\text{эт}} \cdot U_{\text{лн}}/U_{\text{эт}}. \quad (12)$$

6. Полученные значения R занесите в таблицу П. 2 отчета. Рассчитайте R_0 по формуле:

$$R_0 = \Sigma R/n = \dots \text{Ом при } T_0 = \dots \text{ К, где } n = 6.$$

7. Занесите полученное значение R_0 в поле программы «Сопротивление R_0 лампы при комнатной температуре, Ом»

8. Установите максимальный ток лампы, для чего ручку «Рег. тока» поверните в крайнее правое положение (по часовой стрелке).

9. Сфокусируйте излучение при помощи рукоятки 3 и винта 4 (рис. 1) на входной щели монохроматора.

10. Направьте поток излучения на задний выход монохроматора (шток подвижного зеркала 8 монохроматора должен быть выдвинут до упора).

11. Установите с помощью рукоятки $U_{\text{фп}}$ напряжение на фотодатчике равным нулю.

12. Убедитесь при помощи механизма поворота дифракционной решётки 4 в регистрации фототока (прибор «Ток фотодатчика») в широком диапазоне длин волн, в том числе и в инфракрасной области 750 – 850 нм.

13. Поворачивая фотоприёмник на трубе – креплении, получите максимальное значение сигнала $I_{\text{фп}}$, после чего закрепите приемник винтом.

14. Вращением механизма 6, поворачивающего дифракционную решетку монохроматора 5, выберите излучение определенной длины волны, отсчитываемой по шкале отсчетного устройства 7 (шкала монохроматора представлена на рис. 3). Занесите значение длины волны в поле программы «Длина волны λ , нм». Рекомендуется провести измерения для длины волны 600 нм.

15. Измерьте комнатную температуру и занесите ее значение в поле «Комнатная температура T_0 , К».

16. Регулятор «мкА/В» на передней панели ИС поставьте в положение «К=1».

17. Измерьте темновой ток $I_{\text{темн}}$ (шток 8 задвинут до упора) и занесите его значение в соответствующее поле на дисплее.

18. Изменяя напряжение на лампе (с помощью ручки «Рег. тока») в пределах от 4 до 16 В с шагом 1,5-2В, для каждого значения $U_{\text{лн}}$ измерьте напряжение $U_{\text{эт}}$ на эталонном сопротивлении и разность токов $I_{\text{фп}} - I_{\text{темн}}$, пользуясь прибором «Ток фотодатчика» (шток 8 выдвинут, свет падает на фотоприемник). Данные занести в таблицу П. 3 отчета.

19. Расчет температуры производится автоматически по формуле (11) и выводится с помощью термометра и соответствующего поля на экран дисплея. Данные по температуре занести в таблицу П. 3 отчета.

20. Щелкнуть кнопку «измерение» в окне программы: на графике $\ln(I_{\text{фп}} - I_{\text{темн}})=f(1/\lambda T)$ в окне программы должна появляться новая экспериментальная точка.

21. По окончании измерений на данном графике должна получиться зависимость, близкая к линейной. Нажмите кнопку «аппроксимировать функцией $y=a-qx$ » в окне программы. На графике должна появиться аппроксимирующая прямая, а в полях a и q – значения соответствующих констант. Постройте график в отчете, запишите значения констант a и q .

22. По указанию преподавателя, пользуясь графиком, найти тангенс угла наклона прямой q по формуле:

$$q = \frac{[\ln(I_{\phi} - I_{\text{темн}})]_1 - [\ln(I_{\phi} - I_{\text{темн}})]_2}{(1/\lambda T)_1 - (1/\lambda T)_2}. \quad (13)$$

23. Рассчитать

$$h/\kappa = q/c = \dots$$

24. Полученное значение h/κ сравнить с табличным значением.

25. Найти $\Delta(h/\kappa) = (h/\kappa)_{\text{экс}} - (h/\kappa)_{\text{табл}}$.

26. Представить окончательный результат в виде:

$$h/\kappa = (\langle h/\kappa \rangle \pm \Delta(h/\kappa)) = \dots \pm \dots \text{ К} \cdot \text{с}.$$

Задача 2. Проверка закона Стефана-Больцмана.

1. В окне программы перейдите на вкладку «Задача 2. Закон Стефана-Больцмана».

2. Занесите полученное в 1-ой задаче значение R_0 в поле программы «Сопротивление R_0 лампы при комнатной температуре, Ом».

3. Занесите значение температуры в лаборатории в поле «Комнатная температура T_0 , К».

4. Изменяя напряжение на лампе в пределах от 4 до 16 В с шагом 1,5-2В, нажимайте кнопку «измерение» в окне программы, при этом на графике $\ln(P) = f(\ln(T))$ должна появляться новая экспериментальная точка. Помимо нажатия на кнопку «измерение» каждый раз заносите данные по измерению $U_{\text{лн}}$ и $U_{\text{эт}}$ в таблицу П. 4 отчета.

5. Силу тока I определите как $I = U_{\text{эт}}/R_{\text{эт}}$, где $R_{\text{эт}}$ – сопротивление эталонного резистора ($R_{\text{эт}} = 1$ Ом). Данные занести в таблицу П. 4 отчета.

6. Расчет температуры производится автоматически по формуле (11) и выводится с помощью термометра и соответствующего поля на экран дисплея. Данные по температуре занесите в таблицу П. 4 отчета.

7. Рассчитайте мощность излучения абсолютно черного тела P^0 . Энергетическая светимость чёрного тела связана с мощностью излучения следующим соотношением: $R^0 = P^0/S$. При температуре T , значительно превышающей температуру окружающих тел, мощность P^0 теряется телом при излучении. Согласно закону Стефана-Больцмана: $R^0 = \sigma T^4$, где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴). Тогда $P^0 = \sigma T^4 \cdot S$, где S – «видимая» площадь проекции нити лампы накаливания на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения ($S = 0,4 \cdot 10^{-6}$ м²). Значения мощности занести в таблицу П. 4 отчета.

8. Рассчитать мощность излучения нити накаливания P , в качестве которой принимается мощность электрического нагрева ($P=UI$). Значения мощности занести в таблицу П. 4.

9. По окончании измерений на графике $\ln(P)=f(\ln(T))$ должна получиться зависимость, близкая к линейной. Нажмите кнопку «аппроксимировать функцией $y=a-bx$ » в окне программы. На графике должна появиться аппроксимирующая прямая, а в полях a и b значения соответствующих констант. Далее необходимо построить график в отчете, записать значения констант a и b .

10. По указанию преподавателя, на полученной прямой $\ln(P)=f(\ln(T))$ выбрать две далеко отстоящие точки и, используя их координаты, рассчитать тангенс угла наклона прямой по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(\ln P)_2 - (\ln P)_1}{(\ln T)_2 - (\ln T)_1}. \quad (14)$$

12. Сравнить полученное значение с теоретическим $(b)_{T=4}$.

13. Используя полученные значения P и P^0 , рассчитать среднее значение коэффициента теплового излучения лампы накаливания по формуле:

$$\langle a \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (P/P^0)}{n} = \dots \quad (15)$$

14. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Какое электромагнитное излучение называется тепловым?
2. В чем состоит основное отличие теплового излучения от остальных типов излучения?
3. Какая физическая величина характеризует испускательную способность тела?
4. Какая физическая величина характеризует поглощательную способность тела?
5. От каких величин зависит спектральная плотность энергетической светимости?
6. Какое тело называется черным (абсолютно черным)?
7. Какие физические величины связаны между собой в законе Кирхгофа?
8. Зависимость какой величины от температуры выражает закон Стефана – Больцмана?
9. Какой закон называется законом смещения Вина?
10. Какие предположения выдвинул М.Планк при выводе своей формулы?

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

О Т Ч Е Т

по лабораторной работе №410

«Изучение законов теплового излучения»

Студент(ка)_____

Группа_____

Преподаватель_____

Дата_____

1. Цель работы:

2. Расчетные формулы для измеряемых величин:

Отношение постоянной Планка к постоянной Больцмана:

$$h/k=q/c$$

где c – _____,

q – _____

Средний коэффициент теплового излучения лампы накаливания:

$$\langle a \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n (P/P^0)}{n},$$

где $P^0 = \sigma T^4 S$, $P = UI$,

T – _____,

S – _____,

σ – _____,

U – _____,

I – _____.

3. Характеристики средств измерений:

Таблица П. 1

Наименование прибора и его тип	Предел измерений	Цена деления шкалы	Предел основной погрешности
Вольтметр 1 ($U_{лн}$)			
Вольтметр 2 (U_1)			
Амперметр			
Монохроматор			

4. Результаты измерений

4.1. Экспериментальное подтверждение формулы Планка.

1. Расчет сопротивления R_0 лампы при комнатной температуре.

Таблица П. 2

$U_1, В$						
$U_{лн}, В$						
$R, Ом$						

$$R_0 = \Sigma R/n = \dots \text{ Ом при } T_0 = \dots \text{ К.}$$

2. Таблица с результатами измерений

Таблица П. 3

№	$U_{\text{лн}},$ В	$U_{\text{эт}},$ В	$R,$ Ом	$T,$ К	$1/\lambda T \cdot 10^3,$ $\text{м}^{-1}\text{К}^{-1}$	$(I_{\text{фп}} - I_{\text{темн}}),$ мА	$\ln(I_{\text{фп}} - I_{\text{темн}})$

3. График зависимости $\ln(I_{\text{ф}})=f(1/\lambda T)$ прилагается.

4. $h/k =$

$\Delta h/k =$

5. Окончательный результат

$$h/k = (\langle h/k \rangle \pm \Delta(h/k)) = (\dots \pm \dots) \quad \text{К} \cdot \text{с}$$

4.2. Экспериментальная проверка закона Стефана-Больцмана.

1. Таблица с результатами измерений

Таблица П. 4

$U_{\text{лн}},$ В	$U_{\text{эт}},$ В	$I,$ А	$P,$ Вт	$\ln(P)$	$T,$ К	$\ln(T)$	$P^0,$ Вт	a

2. График зависимости $\ln(P)=f(\ln(T))$ прилагается.
3. Расчет тангенса угла наклона прямой, сравнение полученного значения с теоретическим

$$b =$$

4. Расчет коэффициента теплового излучения лампы накаливания $\langle a \rangle =$

5. Выводы по обеим задачам.