

СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



**СПЕЦГЛАВЫ ФИЗИКИ
(ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ)**

Методические указания

Рязань 2018

УДК 530.1
ББК 22.31
С71

Спецглавы физики (тепловое излучение). Методические указания.
Сост. Н.В. Коненков, Совр. техн. универ-т. – Рязань, 2018. – 22 с. – 50 экз.

Рецензент: д.т.н., профессор РВВДКУ Гармаш Ю.В.

Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения, изучающих курс «Спецглавы физики». Первая часть указаний содержит теоретический материал по тепловому излучению; во второй части приведены руководства по выполнению лабораторных работ, с целью расширения и углубления теоретического материала, а так же получения практических навыков работы с пирометром; третья часть содержит задачи для контроля уровня усвоения материала по законам теплового излучения.

Учебное пособие для студентов-бакалавров
Современного технического университета

*Печатается по решению Ученого Совета
Современного технического университета.*

УДК 530.1
ББК 22.31
С71

© Н.В. Коненков
© Современный технический университет, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1. Тепловое излучение и его законы.....	4
2. Лабораторные работы по тепловому излучению.....	13
Лабораторная работа №1 «Изучение законов теплового излучения и проверка закона Стефана-Больцмана для лампы накаливания»	13
Лабораторная работа №2 «Определение постоянной Стефана-Больцмана методом оптической пирометрии».....	18
3. Качественные и количественные задачи по тепловому излучению	23
3.1. Примеры решения задач.....	23
3.2. Задачи для самостоятельного решения.....	25
Литература	27

1. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ЗАКОНЫ

Излучение телами электромагнитных волн (свечение тел) может осуществляться за счёт различных видов энергии. Самым распространённым является тепловое излучение.

Тепловое излучение – электромагнитное излучение, испускаемое за счёт внутренней энергии тела.

Все остальные виды излучения, возбуждаемые за счёт любого вида энергии, кроме внутренней (тепловой), объединяются под общим названием «люминесценция».

Особенности теплового излучения:

1. Имеет место при любой температуре ($T > 0$ К), однако при невысоких температурах излучаются практически лишь длинные (инфракрасные) электромагнитные волны.
2. Является *равновесным процессом*, т.е. может находиться в равновесии с излучающими телами (энергия, излученная телом равна энергии, поглощённой телом при постоянной температуре). Это, в частности, приводит к тому, что тела, интенсивно поглощающие при какой-то температуре, должны интенсивно излучать при той же самой температуре.

К равновесным состояниям и процессам применимы законы термодинамики. Поэтому тепловое излучение должно подчиняться некоторым общим закономерностям, вытекающим из принципов термодинамики. К рассмотрению этих закономерностей мы и перейдём.

В начале введём **характеристики теплового излучения**: *энергетическую светимость тела, испускательную способность тела и поглощательную способность тела.*

1. **Энергетическая светимость тела $R_{\text{э}}$** – количество излучаемой телом энергии с единицы поверхности в единицу времени по всем направлениям и по всем длинам волн при данной температуре:

$$R_{\text{э}} = \frac{1}{\Delta S} \cdot \frac{dW_{\text{изл}}}{dt}; \quad R_{\text{э}} = f(T).$$

В СИ $R_{\text{э}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Измерения показывают, что энергия излучения распределяется по длинам волн, которые испускаются телом, неравномерно. Если разложить излучение в спектр и определить для узкого спектрального интервала $d\lambda$ элементарную энергетическую светимость $dR_{\text{э}}$, то окажется, что

$$dR_{\text{э}} = r_{\lambda T} \cdot d\lambda, \quad \text{т.е. } dR_{\text{э}} \sim d\lambda,$$

где $r_{\lambda T}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от длины волны λ и температуры T .

2. Испускательная способность тела (или спектральная плотность энергетической светимости) $r_{\lambda T}$ – энергия, испускаемая с единицы поверхности тела в единицу времени в пределах единичного интервала длин волн вблизи данной длины волны λ при данной температуре T :

$$r_{\lambda T} = \frac{dR_{\text{э}}}{d\lambda}.$$

В СИ $r_{\lambda T} = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Из этой формулы следует, что $R_{\text{э}} = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda$ – полная или интегральная энергетическая светимость.

Всякое тело не только излучает, но и поглощает падающее на него излучение. При этом энергия электромагнитных волн превращается в тепловую энергию тела.

3. Поглощательная способность тела $a_{\lambda T}$ – безразмерная величина, показывающая какая доля падающей энергии поглощается телом:

$$a_{\lambda T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}}.$$

По определению $0 \leq a_{\lambda T} \leq 1$.

Тело, полностью поглощающее падающее на него излучение всех длин волн при любой температуре, называется **чёрным телом** (устаревшее название – абсолютно чёрное тело). Для него $a_{\lambda T} = a_{\lambda T}^o = 1$.

Тело, для которого $a_{\lambda T} < 1$ и не зависит от λ называют **серым**.

Белое тело – тело, коэффициент поглощения которого равен нулю для всех длин волн: $a_{\lambda T} = 0$. Истинно белых тел в природе нет, однако существуют тела, близкие к ним по свойствам в достаточно широком диапазоне температур и длин волн. Например, зеркало в оптической части спектра отражает почти весь падающий свет.

Чёрных тел в природе также не существует. Сажа или платиновая чернь имеют поглощательную способность $a_{\lambda T}$ близкую к единице, лишь в ограниченном интервале частот; в далёкой инфракрасной области их поглощательная способность заметно меньше единицы.

Однако можно создать устройство, сколь угодно близкое по своим свойствам к чёрному телу. Такое устройство представляет собой почти замкнутую

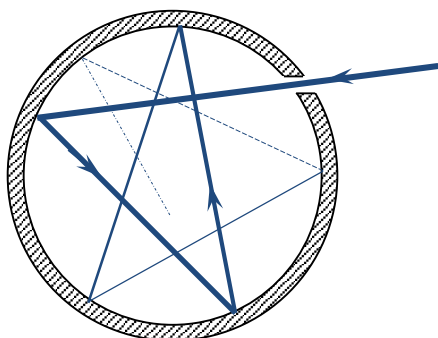


Рис. 1

полость, снабжённую малым отверстием (рис. 1). Излучение, проникшее внутрь через отверстие, прежде чем выйти обратно из отверстия, претерпевает многократные отражения. При каждом отражении часть энергии поглощается, в результате чего практически всё излучение любой длины волны поглощается

такой полостью. По этой причине внутренность комнаты в яркий солнечный день при рассматривании издали через открытое окно кажется тёмной.

Чёрное тело занимает основополагающее значение в теории теплового излучения, поскольку, зная законы излучения чёрного тела можно описать излучение любого другого (реального) тела. Делается это на основе Закона Кирхгофа.

ЗАКОН КИРГХОФА

Как показывает опыт, между испускательной и поглощательной способностями тела имеется связь. Эту связь в 1859 г. установил немецкий физик Густав Кирхгоф¹ на основании второго начала термодинамики.

Рассмотри следующий эксперимент. Пусть внутри замкнутой оболочки, поддерживаемой при постоянной температуре T , помещены несколько тел

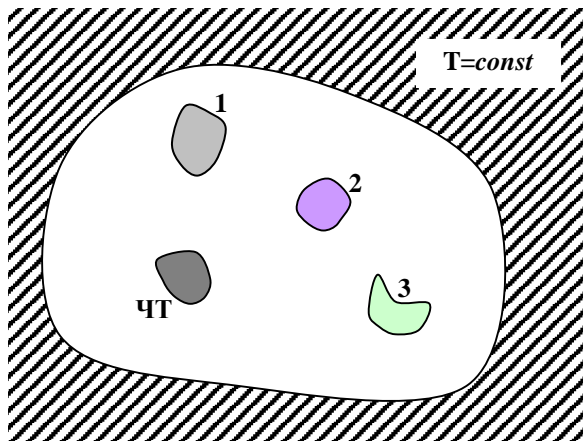


Рис. 2

(рис. 2). Внутри полости кроме рассматриваемых тел больше ничего нет, поэтому тела могут обмениваться энергией между собой и с оболочкой лишь путём испускания и поглощения электромагнитных волн. Опыт показывает, что такая система через некоторое время придёт в состояние теплового равновесия – все тела примут одну и ту же температуру, равную

температуре оболочки T . В таком состоянии тело, обладающее большей испускательной способностью $r_{\lambda T}$, теряет в единицу времени с единицы поверхности больше энергии, чем тело, обладающее меньшей испускательной способностью. Поскольку температура (а, следовательно, и энергия) тел не изменяется, то тело, испускающее больше энергии, должно и больше поглощать, т.е. обладать большей поглощательной способностью $a_{\lambda T}$. Таким образом, чем больше испускательная способность тела $r_{\lambda T}$, тем больше и его поглощательная способность $a_{\lambda T}$. Отсюда вытекает соотношение:

$$\left(\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} \right)_0 = \left(\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} \right)_2 = \left(\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} \right)_3 = \dots,$$

где 0, 1, 2, 3 и т.д. относятся к разным телам.

¹ Густаф Кирхгоф (13.3.1824 – 17.10.1887) – немецкий физик.

Полученное соотношение выражает **закон Кирхгофа**: отношение испускательной и поглотительной способностей не зависит от природы тела и является для всех тел одной и той же универсальной функцией длины волны и температуры:

$$\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} = f(\lambda, T).$$

Сами величины $r_{\lambda T}$ и $a_{\lambda T}$ могут меняться чрезвычайно сильно при переходе от одного тела к другому. Отношение же их оказывается одинаковым для всех тел. Это означает, что тело, сильнее поглощающее какие-либо лучи, будет эти лучи сильнее и испускать (не следует смешивать испускание лучей с их отражением).

Для чёрного тела по определению $a_{\lambda T}^o = 1$, следовательно $\frac{r_{\lambda T}^o}{a_{\lambda T}^o} = r_{\lambda T}^o = f(\lambda, T)$, т.е. универсальная функция Кирхгофа $f(\lambda, T)$ есть не что иное, как испускательная способность чёрного тела.

Важность закона Кирхгофа заключается в том, что с его помощью можно свести задачу исследования свойств теплового излучения любого тела к изучению теплового излучения чёрного тела, т.е. к исследованию вида зависимости $r_{\lambda T}^o = f(\lambda, T)$.

ЗАКОН СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА И ЗАКОНЫ ВИНА

К законам излучения чёрного тела кроме закона Кирхгофа относятся закон Стефана-Больцмана и законы Вина. Теоретическое объяснение этих законов имело огромное значение в истории физики – оно привело к понятию *квантов* энергии.

Долгое время попытки получить теоретически вид функции $f(\lambda, T)$ не давали общего решения. В 1879 г. австрийский физик Йозеф Стефан², анализируя экспериментальные данные (рис. 3), пришёл к выводу, что $R_{\vartheta} \sim T^4$. Австрийский физик Людвиг Больцман³ в 1884 г., исходя из термодинамических соотношений, теоретически получил, что

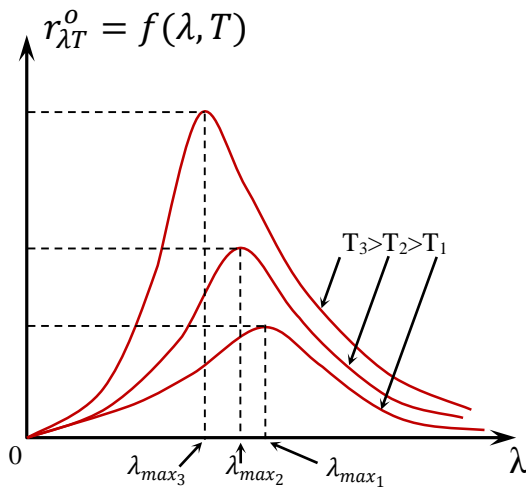


Рис. 3

$$R_{\vartheta}^o = \int_0^{\infty} r_{\lambda T}^o \cdot d\lambda = \sigma T^4.$$

$R_{\vartheta}^o = \sigma T^4$ – закон Стефана-Больцмана,

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Для серых тел ($a_{\lambda T} < 1$) закон Стефана-Больцмана записывается в виде:

$$R_{\vartheta}^o = k\sigma T^4$$

где k – коэффициент серости ($k < 1$).

Законы Вина.

Немецкий физик Вильгельм Вин⁴ в 1893 г. опираясь на законы термодинамики и электродинамики, показал, что зависимость $r_{\lambda T}^o$ от λ и T имеет вид:

$$r_{\lambda T}^o = \frac{c^4}{\lambda^5} \cdot \varphi\left(\frac{c}{\lambda \cdot T}\right), \quad (*)$$

где $\varphi\left(\frac{c}{\lambda \cdot T}\right)$ – универсальная для всех кривых функция.

² Йозеф Стефан (24.3.1835 – 7.1.1893) – австрийский физик.

³ Людвиг Больцман (20.2.1844 – 5.9.1906) – австрийский физик, один из основоположников статистической физики и физической кинетики.

⁴ Вильгельм Вин (13.1.1864 – 30.8.1928) – немецкий физик.

Эта функция в явном виде получена не была, однако выражение (*) даёт возможность определить значение длины волны λ , при котором $r_{\lambda T}^o$ становится максимальной. Для этого необходимо продифференцировать (*) и приравнять результат к нулю:

$$\frac{r_{\lambda T}^o}{d\lambda} = 0.$$

Решением этого дифференциального уравнения является выражение

$$\lambda_{\max} = \frac{c_1}{T}, \quad \text{— закон смещения Вина (первый закон Вина) (**)}$$

где $c_1 = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – первая постоянная Вина.

Таким образом, *длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности чёрного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре.*

Из закона Вина (**) видно, что при нагревании чёрного тела максимум испускательной способности смещается в сторону более коротких длин волн. При комнатной температуре максимум излучения лежит в далёкой инфракрасной области, излучение в видимой области практически отсутствует. При температуре 1000 К появляется красная часть спектра, наступает «красное каление». При увеличении температуры до 5900 К (температура поверхности Солнца), излучение воспринимается глазом как белый дневной свет, поскольку обогащается всё более короткими длинами волн (жёлтыми, зелёными, голубыми, фиолетовыми). При более высокой температуре максимум излучения смещается в ультрафиолетовую область и излучение приобретает голубой оттенок. Возникновение цветов побежалости при нагревании полоски металла в огне также подтверждает закон смещения Вина.

Подстановка (**) в (*) даёт выражение:

$$\left(r_{\lambda T}^o \right)_{\max} = c_2 T^5, \quad \text{— второй закон Вина.}$$

где $c_2 = 1,29 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5}$ – вторая постоянная Вина.

Таким образом, *максимальная испускательная способность чёрного тела пропорциональна пятой степени абсолютной температуры.*

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ. ФОРМУЛА ПЛАНКА

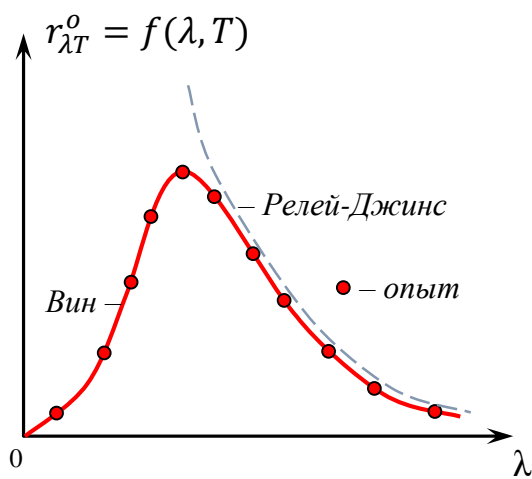
Законы Стефана-Больцмана и Вина не решили основного вопроса теплового излучения, т.е. не могли определить вида функции Кирхгофа, согласующейся с опытными данными в широком диапазоне длин волн и температур.

Исследование вида функции Кирхгофа методами классической физики предпринимались рядом учёных и, в частности, английскими физиками Джоном Рэлеем⁵ и Джеймсом Джинсом⁶. Изучая закономерности теплового излучения с позиций классической статистической физики, они в 1900 г. получили для излучательной способности чёрного тела формулу:

$$r_{\lambda T}^o = f(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \cdot kT,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана,

c – скорость света в вакууме.



Формула Релея-Джинса верна только для длинных волн и совершенно неприменима для коротких. Кроме того, она противоречит законам Вина, Стефана-Больцмана и закону сохранения энергии, поскольку $f(\lambda, T)$ растёт с уменьшением λ (рис. 4), не имеет максимума, а $R_{\lambda T}^o = \infty$ при любой T .

⁵ Джон Уильям Рэлей (12.11.1842 – 30.6.1919) – английский физик, один из основоположников теории колебаний.

⁶ Джеймс Хопвуд Джинс (11.9.1877 – 17.9.1946) – английский физик и астроном.

При уменьшении длины волны из формулы Релея-Джинса следует, что для коротких волн в ультрафиолетовой области и далее излучательная способность чёрного тела возрастает до бесконечности и тело должно излучать всё большее и большее количество энергии. Однако опыт говорит об обратном: при $\lambda \rightarrow 0$, $r_{\lambda T}^o \rightarrow 0$. Все эти затруднения, получившие в науке образное наименование «ультрафиолетовой катастрофы», указывали на наличие в теории каких-то коренных дефектов. Очевидно, что классическая статистическая физика и электромагнитная теория света неприменимы для излучения с короткими длинами волн и какие-то их принципиальные положения должны быть пересмотрены.

Этот пересмотр был произведён немецким физиком Максом Планком⁷ в 1900 г. Планк предположил, что излучения (электромагнитные волны) испускаются телами не непрерывно, а в виде отдельных порций (**квантов**). Энергий такой порции – кванта излучения – пропорциональна его частоте:

$$E = h \cdot \nu,$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Развивая квантовые представления, Планк получил формулу для излучательной способности чёрного тела:

$$r_{\lambda T}^o = f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \text{– формула Планка,}$$

где c – скорость света в вакууме,

k – постоянная Больцмана.

Формула Планка полностью описывает ход экспериментальной кривой функции Кирхгофа и из неё, как частные случаи, получаются законы Стефана-Больцмана, Вина и Релея-Джинса.

Блестящие результаты, достигнутые при применении гипотезы Планка, показали, что должна быть создана новая теория, в которой некоторые физические величины способны принимать не непрерывный, а дискретный ряд значений.

⁷ Макс Карл Эрнст Людвиг Планк (12.4.1858 – 4.10.1947) – немецкий физик-теоретик.

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА ДЛЯ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Цель работы: изучение законов теплового излучения, устройства и принципа действия оптического пирометра, проверка выполнения закона Стефана-Больцмана для лампы накаливания.

Приборы и принадлежности: яркостной пирометр, автотрансформатор, вольтметр, амперметр, лампа накаливания, соединительные провода.

Теория и методика эксперимента

Законы теплового излучения позволяют определить температуру тела без непосредственного контакта с ним. Для некоторых тел (звёзды, Солнце, раскалённый металл, недоступный объект) этот метод является единственным. В этих случаях о температуре тела судят по его излучению. *Приборы, служащие для бесконтактного измерения температуры раскалённых тел, называются пирометрами.*

Принцип работы яркостного пирометра (с «исчезающей нитью») основан на сравнении яркости изображения тела с яркостью нити специальной лампы, совмещённой с изображением (рис. 1).

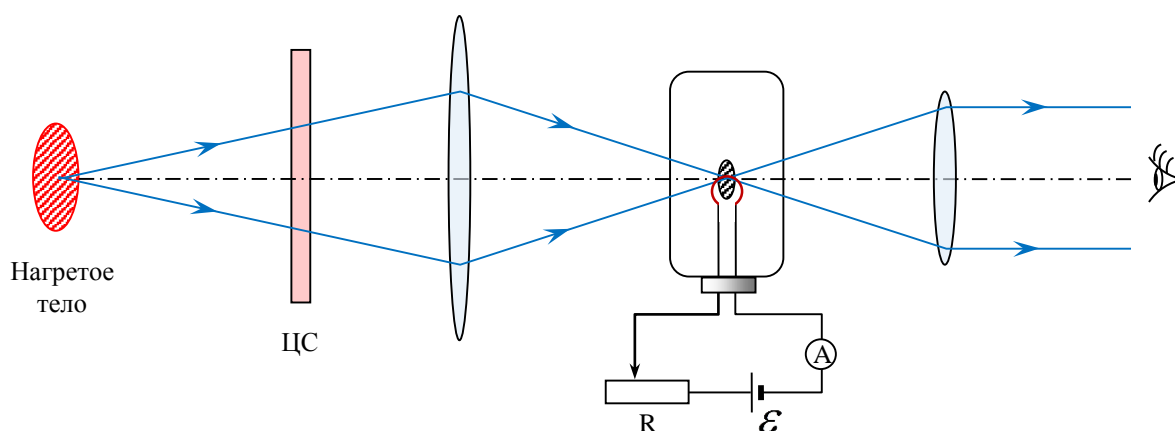


Рис. 1

Лампа питается от источника \mathcal{E} через реостат R . При изменении сопротивления реостата меняется накал нити. В момент, когда яркость нити равна яркости изображения, нить на фоне объекта становится неразличимой («исчезает»). По силе тока, которую в этот момент показывает амперметр, судят о температуре нити, а, следовательно, и объекта. Амперметр градуируется по излучению чёрного тела в градусах Цельсия. Измеренная этим пирометром температура называется *яркостной* (T_J) и она оказывается несколько ниже *истинной температуры* ($T_{И}$), т.к. обычно исследуется не весь поток энергии, а только его часть, выделенная светофильтром $\mathcal{ЦС}$ (обычно красным). *Истинная температура* определяется введением соответствующих поправок:

$$T_{И} = \frac{C_2 \cdot T_J}{C_2 + \lambda \cdot T_J \cdot \ln k}, \quad (1)$$

где $C_2 = 1,439 \cdot 10^{-2}$ – вторая постоянная излучения,

$\lambda = 0,667$ мкм – длина волны, пропускаемая светофильтром,

$k = 0,43$ (для вольфрама) – коэффициент серости.

Из закона Стефана-Больцмана $R_{\mathcal{J}}^o = \sigma T^4$ следует, что количество теплоты, передаваемое единицей поверхности чёрного тела, находящегося при температуре T_1 , в окружающую среду, имеющую температуру T_2 , если среду можно рассматривать как чёрное тело, равно

$$R_{\mathcal{J}}^o = R_1 - R_2 = \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

или для реального тела, с учётом коэффициента серости k ,

$$R = k\sigma (T_1^4 - T_2^4). \quad (2)$$

В стационарном режиме, когда температура вольфрамовой нити не изменяется, энергия, излучаемая нитью, равна электрической энергии подводимой к нити (на основании закона сохранения энергии):

$$R = \frac{I \cdot U}{2S} = \frac{P}{2S}, \quad (3)$$

где I – сила тока в нити лампы; U – напряжение на лампе;

S – площадь излучающей поверхности нити (двойка в знаменателе учитывает невидимую со стороны пирометра половину поверхности нити);

P – электрическая мощность лампы (совпадает с мощностью, излучаемой вольфрамовой нитью лампы).

Из выражений (2) и (3) получаем, что для нашего случая закон Стефана-Больцмана можно записать в виде:

$$P = 2\sigma kS(T_1^4 - T_2^4) = 2\sigma kST^4 \quad (4)$$

(мы пренебрегли величиной T_2^4 , т.к. относительная ошибка в данном случае не превышает 0,1%).

Таким образом, если построить график зависимости мощности P , излучаемой вольфрамовой нитью лампы от четвёртой степени её температуры T^4 , то зависимость должна быть линейной. Это и проверяется в данной работе.

Принципиальная схема установки, на которой проводится работа по определению постоянной Стефана-Больцмана, приведена на рис. 2

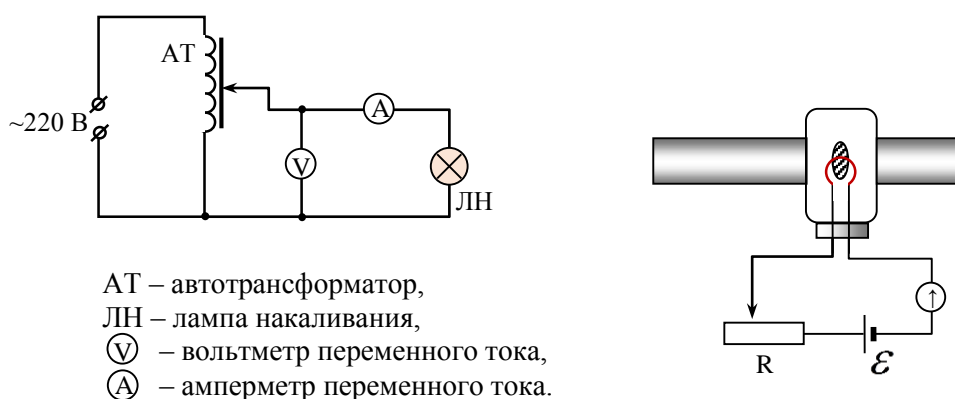


Рис. 2

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с правилами работы оптическим пирометром (находятся в лаборатории).

2. Расположите исследуемую лампу накаливания на расстоянии не менее 70 см от пирометра.
3. Перемещением тубуса объектива пирометра добейтесь чёткого изображения спирали исследуемой лампы.
4. Перемещением тубуса окуляра пирометра добейтесь чёткого изображения нити пирометрической лампы (она имеет вид горизонтального отрезка).
5. Включите установку сеть и дайте прибору прогреться в течение трёх минут (тем временем определите термометром температуру t_k в лаборатории и занесите её значение в таблицу измерений).
6. Устанавливая напряжение U согласно таблице измерений, измеряйте силу тока I , протекающего через вольфрамовую спираль лампы накаливания и её яркостную температуру $t_{ярк}$. Экспериментальные данные заносите в таблицу измерений.
7. Вычислите мощность лампы по формуле $P = I \cdot U$.
8. Переведите яркостные температуры нити лампы из градусов Цельсия в кельвины по формуле: $T_{ярк} = t_{ярк} + 273$.
9. Вычислите температуры нити лампы T по формуле $T = T_{ист} + 0,05 \cdot T_{ист}$, которая учитывает 5% потерь энергии при отражении и поглощении стенками баллона лампы. Значения истинной температуры $T_{ист}$ вычислите по формуле (1).
10. Рассчитайте значения T^4 и занесите их в таблицу.
11. Постройте график зависимости мощности излучения лампы накаливания от четвёртой степени её температуры [$P = f(T^4)$].
12. Сделайте вывод о проделанной работе и укажите, выполняется ли закон Стефана-Больцмана для исследуемой лампы накаливания.

№	$U, В$	$I, А$	$P, Вт$	$t_{ярк}, ^\circ С$	$T_{ярк}, К$	$T, К$	$T^4, К^4$
1	40						
2	50						
3	60						
4	70						
5	80						
6	90						
7	100						

Контрольные вопросы

1. Какое излучение называется тепловым? Каковы его особенности?
2. Назовите характеристики теплового излучения и дайте им определения.
3. Что называется чёрным телом? Серым телом?
4. Приведите пример модели (моделей) чёрного тела.
5. Сформулируйте законы Кирхгофа, Стефана-Больцама, Вина.
6. Что такое пирометры и для чего они используются?
7. Объясните принцип измерения температуры с помощью пирометра.
8. Почему температура нити исследуемой лампы выше температуры нити пирометрической лампы при их одинаковой яркости?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: Учеб. пособие для вузов / И.В. Савельев. – М.: Издательство «Лань», 2011. – 368 с.: ил.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие для студентов учреждений высшего профессионального образования – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 560 с.
3. Трофимова Т.И. Основы физики. Волновая и квантовая оптика: учебное пособие. – М.: Издательский центр «КноРус», 2015. – 224 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ПИРОМЕТРИИ

Цель работы: изучение законов теплового излучения, устройства и принципа действия оптического пирометра, проверка выполнения закона Стефана-Больцмана для лампы накаливания.

Приборы и принадлежности: яркостной пирометр, автотрансформатор, вольтметр, амперметр, лампа накаливания, соединительные провода.

Теория и методика эксперимента

Законы теплового излучения позволяют определить температуру тела без непосредственного контакта с ним. Для некоторых тел (звёзды, Солнце, раскалённый металл, недоступный объект) этот метод является единственным. В этих случаях о температуре тела судят по его излучению. *Приборы, служащие для бесконтактного измерения температуры раскалённых тел, называются пирометрами.*

Принцип работы яркостного пирометра (с «исчезающей нитью») основан на сравнении яркости изображения тела с яркостью нити специальной лампы (пирометрическая лампа), совмещённой с изображением (рис. 1).

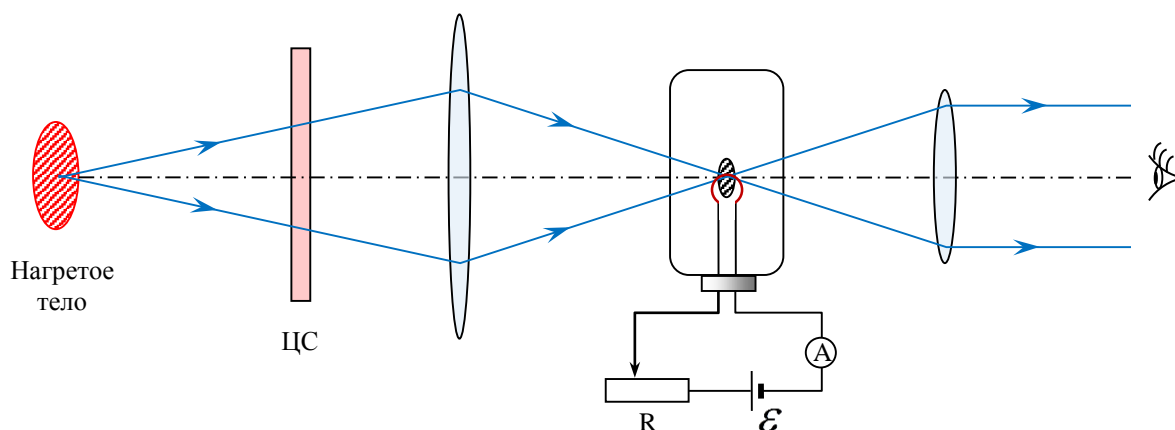


Рис. 1

Лампа питается от источника \mathcal{E} через реостат R . При изменении сопротивления реостата меняется накал нити. В момент, когда яркость нити равна яркости изображения, нить на фоне объекта становится неразличимой («исчезает»). По силе тока, которую в этот момент показывает амперметр, судят о температуре нити, а, следовательно, и объекта. Амперметр градуируется по излучению чёрного тела в градусах Цельсия. Измеренная этим пирометром температура называется *яркостной* ($T_{Я}$) и она оказывается несколько ниже *истинной температуры* ($T_{И}$), т.к. обычно исследуется не весь поток энергии, а только его часть, выделенная светофильтром $\mathcal{ЦС}$ (обычно красным). *Истинная температура* определяется введением соответствующих поправок:

$$T_{И} = \frac{C_2 \cdot T_{Я}}{C_2 + \lambda \cdot T_{Я} \cdot \ln k}, \quad (1)$$

где $C_2 = 1,439 \cdot 10^{-2}$ – вторая постоянная излучения,

$\lambda = 0,667$ мкм – длина волны, пропускаемая светофильтром,

$k = 0,43$ (для вольфрама) – коэффициент серости.

Из закона Стефана-Больцмана $R_{\mathcal{Э}}^o = \sigma T^4$ следует, что количество теплоты, передаваемое единицей поверхности чёрного тела, находящегося при температуре T_1 , в окружающую среду, имеющую температуру T_2 , если среду можно рассматривать как чёрное тело, равно

$$R_{\mathcal{Э}}^o = R_1 - R_2 = \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

или, для реального тела, с учётом коэффициента серости k ,

$$R = k\sigma (T_1^4 - T_2^4). \quad (2)$$

В стационарном режиме, когда температура вольфрамовой нити не изменяется, энергия, излучаемая нитью, равна электрической энергии подводимой к нити (на основании закона сохранения энергии):

$$R = \frac{I \cdot U}{2S}, \quad (3)$$

где I – сила тока в нити лампы; U – напряжение на лампе;

S – площадь излучающей поверхности нити (двойка в знаменателе учитывает невидимую со стороны пирометра половину поверхности нити).

Из выражений (2) и (3) получаем, что значение постоянной Стефана-Больцмана можно найти по формуле:

$$\sigma = \frac{I \cdot U}{2kS(T_1^4 - T_2^4)}. \quad (4)$$

Принципиальная схема установки, на которой проводится работа по определению постоянной Стефана-Больцмана, приведена на рис. 2

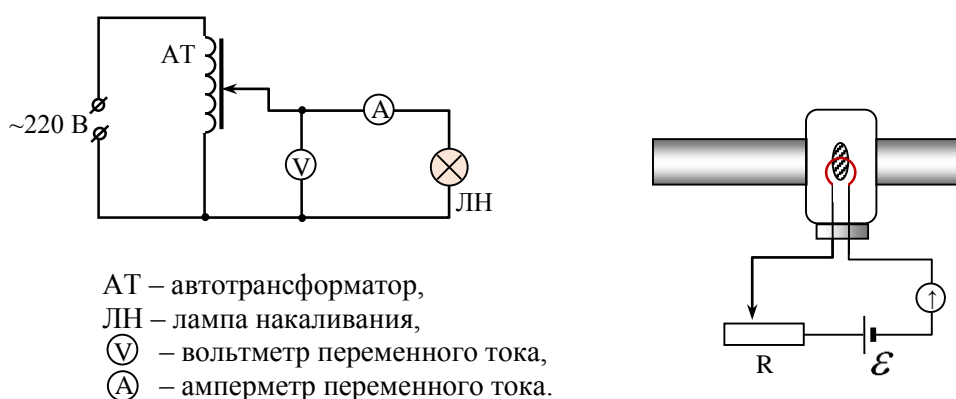


Рис. 2

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с правилами работы оптическим пирометром (находятся в лаборатории).
2. Расположите исследуемую лампу накаливания на расстоянии не менее 70 см от пирометра.
3. Перемещением тубуса объектива пирометра добейтесь чёткого изображения спирали исследуемой лампы.
4. Перемещением тубуса окуляра пирометра добейтесь чёткого изображения нити пирометрической лампы (она имеет вид горизонтального отрезка).

5. Включите установку сеть и дайте прибору прогреться в течение трёх минут (тем временем определите термометром температуру t_k в лаборатории и занесите её значение в таблицу измерений).
6. Устанавливая напряжение U согласно таблице измерений, измеряйте силу тока I , протекающего через вольфрамовую спираль лампы накаливания и её яркостную температуру $t_{ярк}$. Экспериментальные данные заносите в таблицу измерений.
7. Переведите яркостные температуры нити лампы и температуру в лаборатории из градусов Цельсия в кельвины по формулам: $T_{ярк} = t_{ярк} + 273$ и $T_2 = t_k + 273$.
8. Вычислите температуры нити лампы T_1 по формуле $T_1 = T_{ист} + 0,05 \cdot T_{ист}$, которая учитывает 5% потерь энергии при отражении и поглощении стенками баллона лампы. Значения истинной температуры $T_{ист}$ вычислите по формуле (1).
9. По формуле (4) вычислите значения постоянной Стефана-Больцмана для каждого опыта. Площадь нити накаливания примите равной $14,0 \text{ мм}^2$.
10. Рассчитайте среднее значение постоянной Стефана-Больцмана

$$\sigma_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^7 \sigma_i}{7}.$$

11. Вычислите абсолютную погрешность измерений по формуле

$$\Delta\sigma = t_{\alpha,n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{cp} - \sigma_i)^2}{n \cdot (n-1)}},$$

где $t_{\alpha,n} = 2,8$ для числа измерений $n=5$.

12. Сделайте вывод о проделанной работе с указанием окончательного результата в виде: $\sigma = (\sigma_{cp} \pm \Delta\sigma) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$; $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{cp}} \approx \dots\%$ и сравните полученное

значение постоянной Стефана-Больцмана с табличным

$$\left(\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4} \right).$$

№	$U, В$	$I, А$	$t_{ярк}, °С$	$T_{ярк}, К$	$T_1, К$	$t_k, °С$	$T_2, К$	$\sigma_i, \frac{Вт}{м^2 К^4}$	$\sigma_{cp}, \frac{Вт}{м^2 К^4}$	$\Delta\sigma, \frac{Вт}{м^2 К^4}$	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}, \%$
1	40										
2	50										
3	60										
4	70										
5	80										

Контрольные вопросы

1. Какое излучение называется тепловым? Каковы его особенности?
2. Назовите характеристики теплового излучения и дайте им определения.
3. Что называется чёрным телом? Серым телом?
4. Приведите пример модели (моделей) чёрного тела.
5. Сформулируйте законы Кирхгофа, Стефана-Больцама, Вина.
6. Что такое пирометры и для чего они используются?
7. Объясните принцип измерения температуры с помощью пирометра.
8. Почему температура нити исследуемой лампы выше температуры нити пирометрической лампы при их одинаковой яркости?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: Учеб. пособие для втузов / И.В. Савельев. – М.: Издательство «Лань», 2011. – 368 с.: ил.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие для студентов учреждений высшего профессионального образования – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 560 с.
3. Трофимова Т.И. Основы физики. Волновая и квантовая оптика: учебное пособие. – М.: Издательский центр «КноРус», 2015. – 224 с.

3. КАЧЕСТВЕННЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ ПО ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ



3.1. Примеры решения задач

Пример 1. В комнате стоят два одинаковых чайника, содержащие равные массы воды при 90°C . Один из них никелированный, а другой тёмный. Какой из чайников быстрее остынет? Почему?

Ответ: По закону Кирхгофа отношение испускательной и поглощательной способностей одинаково у всех тел. Никелированный чайник отражает почти весь свет. Следовательно, его поглощательная способность мала. Соответственно мала и испускательная способность. Для тёмного чайника поглощательная способность велика, следовательно и испускательная способность большая. Быстрее теряя энергию на излучение тёмный чайник остынет быстрее.

Пример 2. На какую длину волны приходится максимум излучения тела человека, если средняя температура его поверхности 36°C ?

Дано:	Решение.
$T = 36 + 273 = 309 \text{ К}$	По закону Вина:
$\lambda_{\text{max}} - ?$	$\lambda_{\text{max}} = \frac{c_1}{T},$
	где $c_1 = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Подставляя числовые значения получим:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{309} = 9,38 \cdot 10^{-6} \text{ (м)} = 9,38 \text{ мк.}$$

Полученная длина волны соответствует средневолновой области инфракрасного излучения ($\lambda = 2,5 - 50 \text{ мк}$).

Пример 3. Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум спектральной плотности энергетической светимости соответствует длине волны 500 нм . Принимая Солнце за чёрное тело, определите: 1) энергетическую светимость Солнца; 2) поток энергии, излучаемый Солнцем; 3) массу электромагнитных волн (всех длин), излучаемых Солнцем за 1 с .

<p>Дано:</p> <p>$\lambda_{\max} = 500 \text{ нм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$</p> <p>$t = 1 \text{ с}$</p> <hr/> <p>$R_{\text{Э}} - ?$</p> <p>$\Phi - ?$</p> <p>$m - ?$</p>	<p>Решение.</p> <p>1. Энергетическая светимость $R_{\text{Э}}$ чёрного тела выражается формулой Стефана-Больцама:</p> $R_{\text{Э}} = \sigma \cdot T^4, \quad (1)$ <p>где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$.</p> <p>Температуру излучающей поверхности найдём из закона Вина:</p>
--	---

$$\lambda_{\max} = \frac{c_1}{T}, \quad \text{где } c_1 = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}. \quad (2)$$

Выразим температуру T из формулы (2) и поставим в (1):

$$R_{\text{Э}} = \sigma \cdot \left(\frac{c_1}{\lambda_{\max}} \right)^4.$$

Подставляя числовые значения получим:

$$R_{\text{Э}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 63,99 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \approx 64 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}.$$

2. Поток энергии Φ , излучаемый Солнцем, равен произведению энергетической светимости $R_{\text{Э}}$ Солнца на площадь его поверхности S :

$$\left. \begin{array}{l} \Phi = R_{\text{Э}} \cdot S \\ S = 4\pi r^2 \end{array} \right\} \Phi = 4\pi r^2 \cdot R_{\text{Э}},$$

где $r = 6,96 \cdot 10^8 \text{ м}$ – радиус Солнца.

Подставляя числовые значения получим:

$$\Phi = 4 \cdot 3,14 \cdot (6,96 \cdot 10^8)^2 \cdot 64 \cdot 10^6 \approx 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт}.$$

3. Массу электромагнитных волн (всех длин), излучаемых Солнцем за $t=1 \text{ с}$, определим, применив соотношение Эйнштейна для энергии и массы $E = m \cdot c^2$. Энергия электромагнитных волн, излученных за время t , равна произведению потока энергии Φ (мощности излучения) на время: $E = \Phi \cdot t$.

$$\left. \begin{array}{l} E = m \cdot c^2 \\ E = \Phi \cdot t \end{array} \right\} m = \frac{\Phi \cdot t}{c^2}.$$

Подставляя числовые значения получим:

$$m = \frac{3,9 \cdot 10^{26} \cdot 1}{(3 \cdot 10^8)^2} \approx 4,3 \cdot 10^9 \text{ кг}.$$

3.2. Задачи для самостоятельного решения

1. Нагревая кусок стали, при температуре 800°C будем наблюдать яркое вишнево-красное каление, но прозрачный стерженёк плавленного кварца при той же температуре совсем не светится. Почему?
2. Для уничтожения жучков-вредителей зерно подвергают действию инфракрасного облучения. Почему жучки погибают, а зерно нет?
3. Чайная фарфоровая чашка на светлом фоне имеет тёмный рисунок. Объясните, почему если эту чашку быстро вынуть из печи, где она нагрелась до высокой температуры, и рассматривать в темноте, то наблюдается светлый рисунок на тёмном фоне.
4. Определите, во сколько раз необходимо уменьшить термодинамическую температуру чёрного тела, чтобы его энергетическая светимость ослабилась в 16 раз. [В 2 раза]
5. Во сколько раз надо увеличить термодинамическую температуру чёрного тела, чтобы его энергетическая светимость возросла в два раза? [В 1,19 раза]
6. Какую мощность излучения имеет Солнце? Излучение Солнца считать близким к излучению чёрного тела. Температура поверхности Солнца 5800 K . [$3,9 \cdot 10^{26}\text{ Дж}$]
7. Температура вольфрамовой спирали в 25-ваттной электрической лампочке 2450 K . Отношение её энергетической светимости к энергетической светимости чёрного тела при данной температуре $k=0,3$. Найдите площадь излучающей поверхности спирали. [$0,4\text{ см}^2$]
8. Вольфрамовая нить накаливается в вакууме током 1 A до температуры 1000 K . При какой силе тока нить накалится до 3000 K ? При расчёте пренебрегите потерями энергии вследствие теплопроводности подвесов нити и обратным излучением окружающих тел. [8 A]
9. Температура внутренней поверхности муфельной печи при открытом отверстии площадью 30 см^2 равна 1300 K . Принимая, что отверстие печи излучает как чёрное тело, определите, какая часть мощности рассеивается стенками печи, если потребляемая печью мощность составляет $1,5\text{ кВт}$. [$67,6\%$]

10. Муфельная печь потребляет мощность 0,5 кВт. Температура её внутренней поверхности при открытом отверстии диаметром 5 см равна 700 °С. Какая часть потребляемой мощности рассеивается стенками? [$\approx 80\%$]
11. Колосниковая решётка площадью 2 м² окружена железными стенками. Температура угля на решётке равна 1300 К, температура стенок 600 К. Коэффициенты поглощения угля и окисленного железа можно считать равными 0,9. Вычислите количество теплоты, передаваемое от решётки к стенкам за 1 ч путём излучения. [10^9 Дж]
12. Чёрное тело находится при температуре 3000 К. При остывании тела длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на 8 мкм. Определите температуру, до которой тело охладилось. [323 К]
13. Чёрное тело нагрели от температуры 600 К до 2400 К. Определите: 1) во сколько раз увеличилась его энергетическая светимость; 2) как изменилась длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости. [1) в 256 раз; 2) уменьшилась на 3,62 мкм]
14. Считая никель чёрным телом, определите мощность, необходимую для поддержания температуры расплавленного никеля 1453 °С неизменной, если площадь его поверхности равна 0,5 см². Потерями энергии пренебречь. [25,2 Вт]
15. Определите температуру тела, при которой оно при температуре окружающей среды 23 °С излучало энергии в 10 раз больше, чем поглощало. [533 К]
16. Температура верхних слоёв Солнца равна 5300 К. Считая Солнце чёрным телом, определите длину волны, которой соответствует максимальная спектральная плотность энергетической светимости Солнца. [547 нм]
17. Принимая Солнце за чёрное тело и учитывая, что его максимальной спектральной плотности энергетической светимости соответствует длина волны 500 нм, определите: 1) температуру поверхности Солнца; 2) энергию, излучаемую Солнцем в виде электромагнитных волн за 10 мин; 3) массу, теряемую Солнцем за это время вследствие излучения. [1) 5800 К; 2) $2,34 \cdot 10^{29}$ Дж; 3) $2,6 \cdot 10^{12}$ кг]

4. Литература

1. Сивухин Д.В. ЭБС Книгафонд: Общий курс физики: Учебное пособие для вузов. В 5 т. ФИЗМАТЛИТ, 2011
2. Трофимова Т.И. Физика: учебник. – М.: Академия, 2012. – 320 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. Задачи и решения: учеб. пособие. – М.: Академия, 2012. – 592 с.

Подписано в печать 15.03.18. Формат 84x108/32

Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Бумага мелованная. Усл. Печ. л. – 3,14

Тираж 50 экз.

Издательство Современного технического университета

390048, г. Рязань, ул. Новоселов, 35А.

(4912) 300630, 30 08 30