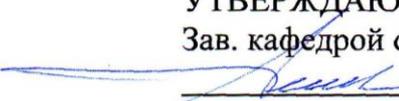


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой общей физики ФТИ


А.М. Лидер

« ___ » _____ 2016 г.

Лабораторная работа № 3-14 а

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Общая физика» по теме «Оптика»
для студентов всех направлений специальностей

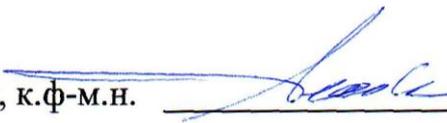
Томск – 2016

УДК 53.072:681.3

Изучение явления теплового излучения. Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу "Общая физика" по теме «Оптика» для студентов всех направлений и специальностей. – Томск. Изд. ТПУ, 2016.-19 с.

Составитель: Т.Н. Мельникова

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры общей физики «__»_____2016 г.

Зав. кафедрой, к.ф-м.н.  А.М. Лидер

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: изучить явление теплового излучения на примере измерения температуры нити накаливания пирометром, определить постоянную Стефана-Больцмана, постоянную Планка.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка, радиационный пирометр С-500.7, двухканальный регулируемый блок питания.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В физическом практикуме большинство работ проводится до изложения материала на лекциях, поэтому постановка задачи может носить проблемно-ориентированный деятельностный характер, требующий самостоятельной проработки материала.

В частности, в теме «Тепловое излучение» изучается излучение спирали (нити накаливания), по которой пропускается электрический ток, а температура измеряется в видимом оптическом диапазоне длин волн. Отметим, что в данной теме теория объединила термодинамику и оптику. Поэтому исследованию подлежит вопрос о термодинамическом равновесии между нагретым телом и излучением. Энергия нагретого тела E_1 много больше энергии излучения E_2 , что и составляет суть проблемной ситуации.

Следующей проблемой является соотношение между различными видами энергии – «электронной», «колебательной» и «вращательной». Методы изучения теплового излучения в модельно-виртуальном виде составляют второй подуровень теоретической проблемной ситуации. Практическая часть состоит в том, чтобы создать искусственный слой с заранее заданными светотехническими параметрами. Должен быть разработан и сконструирован специальный слой, конструкция которого представляет интерес в практическом плане и который может быть востребован на потребительском рынке. Третий подуровень составляет проблему учета конвекционных потерь, потерь при переносе энергии в конструктивных элементах, проблемы выделения энергетического спектра теплового излучения при комнатных и низких температурах, выделение связей данной проблемы с явлениями переноса.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

При нагревании любого тела повышается запас его энергии, сосредоточенной на различных степенях свободы: поступательного движения атомов и молекул газа, вращательного и колебательного

движения атомов или ионов в молекулах и кристаллах и т.д. При достаточно высоких температурах возбуждаются электронные степени свободы: вследствие усиления колебательного движения атомных остовов в молекулах и кристаллах, столкновений атомов и молекул газа электроны переходят на более высокие электронные уровни. В полупроводниках это, например, переходы из валентной зоны в зону проводимости.

Можно отразить тот факт, что в металлах, где энергетическая щель между зонами отсутствует, хаотическое поступательное движение электронного газа возрастает, начиная с самых низких температур ($T \geq 0$), одновременно усиливается колебательное движение ионных остовов в узлах кристаллической решетки. Наконец, при очень высоких температурах любые вещества плавятся и переходят в газообразное состояние, электроны покидают свои атомы и молекулы, последние становятся ионами, т.е. наступает плазменное состояние вещества. Колебательное движение электрических зарядов порождает электромагнитное излучение. Колебаниям ионов, составляющих вещество, соответствует излучение низкой частоты (инфракрасное) благодаря значительной массе колеблющихся зарядов.

Излучение, возникающее вследствие колебательного движения электронов, может иметь высокую частоту (видимый и ультрафиолетовый свет). В металлах, где много свободных электронов, которые хаотически двигаются, сталкиваясь с колеблющимися ионами, следует говорить не о колебательном движении электронов, а их нерегулярном торможении при столкновениях. Их излучение приобретает характер импульсов, т.е. характеризуется спектром различных длин волн, свойственных тормозному излучению (синхротронное и рентгеновское). При достаточно высоких температурах (более $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) в веществе появляются быстрые электроны, спектр тормозного излучения которых захватывает видимый диапазон длин волн (красное каление). Характер тормозного излучения носит также излучение свободных электронов в плазме. При сверхвысоких температурах плазмы это излучение распространяется уже на рентгеновскую область спектра.

Таким образом, любые нагретые тела, т.е. тела с температурой больше 0 K испускают электромагнитное излучение, микроскопические механизмы которого различны в разных интервалах температур (дипольное излучение ионных и электронных осцилляторов, тормозное излучение, характеристическое рентгеновское излучение, излучение Вавилова – Черенкова).

Если тепло – единственный источник энергии, обеспечивающий

излучение, и излучающее тело можно характеризовать определенной температурой, то излучение называется тепловым (или температурным).

Несмотря на многообразие микромеханизмов, вносящих вклад в тепловое излучение, оно подчиняется универсальным закономерностям, не зависящим от конкретной природы излучающих тел. Тепловое излучение в связи с этим можно противопоставить всем иным видам излучения (люминесценция, синхротронное излучение, излучение Вавилова – Черенкова и т.д.). Важно понимать, что в теории теплового излучения объединены представления термодинамики и оптики. Эти представления (противоречия) привели к созданию принципиально новой теории – квантовой физики (квантовой оптики).

РАВНОВЕСНЫЙ ХАРАКТЕР ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Если излучающее тело поместить в замкнутую вакуумную полость с идеально отражающими зеркальными стенками, то излучение тела не уходит в бесконечность, а остается в полости. При равной температуре полости, тела и окружающего пространства излучающее тело и излучение в полости не будут терять энергию в окружающее пространство. Энергия данной системы содержится частично в виде внутренней энергии излучающего тела и в виде энергии излучения (электромагнитных волн). Из термодинамики следует, что в рассматриваемой равновесной термодинамической системе должно существовать равновесие между телом (веществом) и его излучением, т.е. тело будет в единицу времени терять на излучение столько же энергии, сколько поглощать ее от падающего на него излучения из полости (иначе температура не оставалась бы постоянной). Такое равновесное состояние является устойчивым. В общем случае тело испускает излучение всех частот. Распределение энергии электромагнитного излучения в полости по частотам (длинам волн) характеризуется определенной функцией, зависящей только от температуры тела и не зависящей от конкретной природы (стекло, керамика, металл и т.д.). На практике чаще всего приходится иметь дело с излучением тел, не находящихся в равновесии с их собственным излучением. Это обстоятельство необходимо учитывать в проектных решениях проблемно-ориентированного анализа конкретной ситуации. Для многих тел (тел, не способных люминесцировать) это обстоятельство не очень существенно и не приводит к значительному отклонению характеристик излучения от того, какое наблюдалось бы для того же тела в строго равновесных условиях.

Неравновесность условий излучения заключается в том, что самый наружный слой тела, отдающий энергию вовне, и не получающий

эквивалентного количества энергии от внешнего излучения, не находится в равновесных условиях. Он не может быть охарактеризован температурой, присущей остальному объему тела.

На практике отклонение от равновесия в приповерхностном слое невелико, и состояние этого слоя можно описать определенной температурой. Теперь нужно определить величину этого слоя. Толщину этого слоя можно принять равной глубине проникновения излучения в данный материал. Как сделать такое заключение? Очевидно, что другое предположить невозможно. Далее следует понять, что излучение затухает на расстоянии, равном длине волны, так что приповерхностный слой очень тонок. В большинстве металлов равновесное состояние устанавливается очень быстро (10^{-13} с). Поэтому поверхностный слой, находящийся в контакте с термостатирующим его объемом металла, находится практически в равновесном состоянии, несмотря на огромный расход энергии на излучение. Благодаря малой толщине поверхностного слоя и большой теплопроводности металла, температура на поверхности почти такая же, как в объеме.

В случае частично прозрачных материалов, например тех, которые используются в рекламных целях, на толщине слоя, равном глубине проникновения излучения, величина градиента температуры может быть существенной. Здесь проявляется проблемность ситуации, т.к. следует учесть рассмотренную роль поверхностного слоя. Следует заметить, что и в случае прозрачных материалов распределение энергии по степеням свободы всюду квазиравновесно, что является необходимым и достаточным условием того, чтобы излучение тела было близко к тепловому (равновесному).

Излучение, вызываемое не нагреванием, а любым другим способом, не будет равновесным. Это утверждение в традиционном теоретическом аспекте является проблемной ситуацией. При проблемно-ориентированном обучении такую ситуацию также можно считать проблемной, если требуется провести технологический анализ явления, при котором происходит измерение энергии излучения в широком диапазоне температур, и т.д. В противном случае ситуация является не проблемной, а учебно-объяснительной (дескриптивной).

ЗАКОН КИРХГОФА

Тепловое или термодинамически равновесное излучение подчиняется некоторым общим закономерностям, вытекающим из термодинамики. Фундаментальными законами теплового излучения, опирающимися на принципы термодинамики, являются закон Кирхгофа (1859) и закон Стефана-Больцмана (1896). Тепловое излучение в общем

фундаментальном значении для кардинального изменения концепций физики имеет принципиальнейшее значение, так как теория теплового излучения объединила термодинамику и оптику и занимает среди объединительных идей физики важное место.

Для записи закона Кирхгофа рассмотрим **два понятия**.

1. **Интегральная излучательная способность** тела при данной температуре E_T (или **плотность потока излучения**) – это поток энергии, испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям в сферическое полупространство. Величина E_T соответствует фотометрическому понятию *энергетической светимости*. Поскольку всегда имеет место то или иное распределение испускаемой энергии по частотам (длинам волн), вводится еще понятие спектральной излучательной способности $E_{\nu T}$, соответствующей мощности, испускаемой телом с единицы площади в единичном интервале частот (Вт/см²·Гц). Аналогично определяется спектральная излучательная способность в шкале длин волн $E_{\lambda T}$. Мощность, излучаемая с единицы площади в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ или от λ до $\lambda + d\lambda$, запишется как $E_{\nu T} d\nu$ или $E_{\lambda T} d\lambda$, а интегральная излучательная (испускательная) способность

$$E_T = \int E_{\nu T} d\nu = \int E_{\lambda T} d\lambda. \quad (1)$$

2. **Поглощательная способность** тела при данной температуре определяется как отношение той части падающего на тело потока, $E_{\text{погл}}$, которая поглощается телом (превращается в тепло), ко всему падающему потоку $E_{\text{пад}}$

$$A = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}}. \quad (2)$$

Опыт показывает, что поглощательная способность тел в разных спектральных интервалах различна, т.е. для более детального описания рассматриваемого свойства тел поглощать электромагнитные волны необходимо ввести еще **спектральную поглощательную способность**:

$$A_{\nu T} = \frac{dE_{\nu T \text{ погл}}}{dE_{\nu T \text{ пад}}}, \quad (3)$$

$$A_{\lambda T} = \frac{dE_{\lambda T \text{ погл}}}{dE_{\lambda T \text{ пад}}}, \quad (4)$$

где $dE_{\nu T \text{ пад}}$ и $dE_{\lambda T \text{ пад}}$ – «монохроматические» потоки падающего излучения, а точнее, потоки в узких спектральных интервалах частот от

ν до $\nu + d\nu$ или от λ до $\lambda + d\lambda$. Зная спектральную поглощательную способность $A_{\nu T}$ и распределение энергии по спектру в падающем потоке $E_{\nu \text{пад}}$, можно найти часть потока, поглощаемого телом:

$$E_{\text{погл}} = \int_0^{\infty} A_{\nu T} dE_{\nu \text{пад}}. \quad (5)$$

Кирхгоф установил закон, согласно которому отношение спектральной испускательной и поглощательной способности не зависит от природы тела и для всех тел выражается одной и той же универсальной функцией частоты ν и температуры T .

$$f(\nu, T) = \frac{E_{\nu, T}}{A_{\nu, T}}.$$

СПЕКТРАЛЬНАЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА

Как уже отмечалось, спектральная испускательная способность $E_{\nu T}$, соответствующая мощности, испускаемой телом с единицы площади в единичном интервале частот (Вт/см²·Гц), равна

$$E_{\nu, T} = \frac{dE_T}{d\nu}.$$

Аналогично определяется спектральная испускательная способность в шкале длин волн

$$E_{\lambda, T} = \frac{dE_T}{d\lambda}.$$

Все тела, излучающие электромагнитную энергию, в той или иной степени поглощают энергию, приносимую к ним излучением других нагретых тел. Каждое тело характеризуют величиной, которая называется спектральной поглощательной способностью или коэффициентом поглощения $A_{\lambda T}$, в общем случае зависящим от температуры тела, от длины волны падающего излучения, а также от материала и свойств поверхности поглощающего тела. Коэффициент поглощения $A_{\lambda T}$ показывает, какая доля лучистой энергии, падающей за единицу времени на единицу поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, поглощается данной поверхностью. Тело называют абсолютно черным (АЧТ), если у него при всех длинах волн $A_{\lambda T} = 1$. У всех точек, т.е. нечерных тел, $A_{\lambda T} < 1$.

Нечерные тела подразделяются на серые и селективные. У серых тел коэффициент поглощения имеет одинаковое значение для всех длин волн и зависит только от температуры и материала данного тела. У

селективных тел $A_{\lambda T}$ изменяется, кроме того, в зависимости от длины волны. К селективным (т.е. избирательно поглощающим) относится большинство материалов, в том числе вольфрам и никель. Связь между спектральной плотностью излучательности и спектральной поглощательной способностью выражена законом Кирхгофа.

На рис.1 показан вид кривых спектрального распределения энергии черного (1), серого (2) и селективного (3) излучения при одинаковой для всех этих тел температур T .

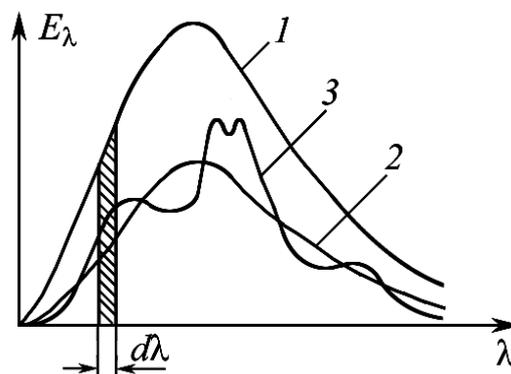


Рис. 1

При одинаковой температуре спектральная плотность излучательности и излучательность нечерных тел меньше, чем у абсолютно черного тела.

Излучательность абсолютно черного тела, имеющего температуру T , пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры (закон Стефана-Больцмана)

$$E_T = \sigma T^4. \quad (6)$$

Величина σ называется постоянной Стефана-Больцмана. Закон Стефана-Больцмана можно использовать для вычисления σ , если опытно определить излучательность E_T и соответствующую ей температуру T абсолютно черного тела. Реальные нагретые тела, не являясь абсолютно черными, при температуре T излучают энергию $E_T' < E_T$. Их излучательность можно подсчитать по формуле (7), содержащей средний при данной температуре коэффициент поглощения A_T , или по формуле (6), в которую вместо истинной температуры T подставить значение температуры, называемой энергетической T_Σ .

$$E_T' = A_T \sigma T^4. \quad (7)$$

Энергетической (или радиационной) температурой нечерного тела, имеющего истинную температуру T , называется такая температура, при которой излучательность абсолютно черного тела совпадает с излучательностью нечерного тела при температуре T .

Ясно, что $T_{\text{Э}} < T$. Исходя из определения энергетической температуры, легко показать, что истинная температура нечерного тела

$$T = \frac{T_{\text{Э}}}{\sqrt[4]{A_T}}.$$

Для характеристики теплового излучения нечерных тел, кроме энергетической температуры, введено понятие $T_{\text{Я}}$ яркостной температуры.

Яркостная температура – это температура, которую должно иметь абсолютно черное тело для того, чтобы его спектральная плотность излучательности для длины волны λ оказалась совпадающей со спектральной плотностью излучательности нечерного тела при температуре T для данной длины волны.

Очевидно, что яркостная температура для разных участков спектра различна, но всегда меньше, чем истинная температура тела. Чаще всего яркостную температуру измеряют для длины волны $\lambda = 0,660$ мкм.

Из формулы Планка получают формулу (8), связывающую яркостную температуру $T_{\text{Я}}$ с истинной температурой T нагретого тела:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{\text{Я}}} + \frac{\lambda}{C_2} \ln A_{\lambda T}. \quad (8)$$

В данной формуле λ – длина волны, при которой измеряется яркостная температура; C_2 – постоянная, входящая в формулу Планка:

$$C_2 = \frac{hc}{k} = 1,432 \text{ см}\cdot\text{град};$$

$A_{\lambda T}$ – спектральная поглощательная способность тела для данной длины волны λ .

Уравнение (8) позволяет вычислить истинную температуру нагретого тела, если известны его яркостная температура и спектральная поглощательная способность для данной длины волны.

Энергетическая температура измеряется с помощью радиационных, а **яркостная** – с помощью оптических пирометров.



Рис.2
Пирометр микропроцессорный

Пирометр микропроцессорный С-500.7 (рис. 2) предназначен для бесконтактного измерения температуры поверхностей твердых (сыпучих) тел и расплавов различных материалов по их собственному тепловому излучению

В основе работы пирометров С-500.7 лежит принцип преобразования потока инфракрасного излучения от объекта, принимаемого чувствительным элементом, в электрический сигнал, пропорциональный спектральной плотности мощности потока излучения.

Область применения пирометров С-500.7: металлургия, энергетика, машиностроение, цементная промышленность, стекольная промышленность, коксохимическая промышленность, легкая промышленность.

ПРИНЦИП РАБОТЫ, УСТРОЙСТВО ИНФРАКРАСНОГО ПИРОМЕТРА И ЕГО ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Пирометром называют прибор, который измеряет температуру по тепловому электромагнитному излучению и предоставляет информацию в форме, удобной для пользователя. Инфракрасные пирометры, использующие метод радиационной пирометрии, являются наиболее распространенным классом среди устройств подобного рода (другие названия — инфракрасный термометр или инфракрасный радиометр). Конструктивно такой пирометр представляет собой пирометрический преобразователь и устройство отображения информации, аналоговое или цифровое.

Принцип действия инфракрасного пирометра основан на измерении абсолютного значения амплитуды электромагнитного излучения от объекта в инфракрасной части спектра и последующем

преобразовании измеренного значения в температуру. Схема такого пирометра с оптическим видоискателем изображена на рисунке 3:

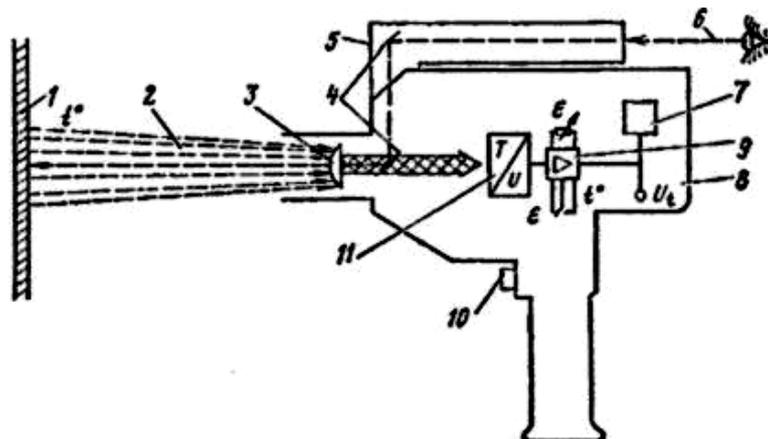


Рис.3

Устройство пирометра: 1 — объект измерения; 2 — тепловое излучение; 3 — оптическая система; 4 — зеркало; 5 — видоискатель; 6 — ось видоискателя; 7 — измерительно-счетное устройство; 8 — корпус; 9 — электронный преобразователь; 10 — кнопка; 11 — датчик

Тепловой луч, сфокусированный оптической системой, падает на датчик (первичный пирометрический преобразователь), в результате на выходе образуется электрический сигнал, пропорциональный значению температуры объекта измерения. Этот сигнал проходит через электронный преобразователь (вторичный пирометрический преобразователь), попадает в измерительно-счетное устройство и обрабатывается в нем. Результат отображается на дисплее (индикация у современных пирометров, как правило, цифровая).

Чтобы получить точное значение температуры объекта, пользователю нужно лишь включить прибор, навести его на объект измерения и нажать на кнопку. На сегодняшний день этот метод бесконтактного измерения температуры является одним из самых простых и недорогих. Измерения можно проводить практически на любом расстоянии, дальность действия современных пирометров ограничивается только площадью измеряемого пятна и прозрачностью среды.

ОПТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Оптическим разрешением (другое название — показатель визирования) называют отношение диаметра светового пятна и расстояния до объекта измерения. В технической документации к пирометру обычно указывается конкретное значение показателя визирования или приводится диаграмма направленности.

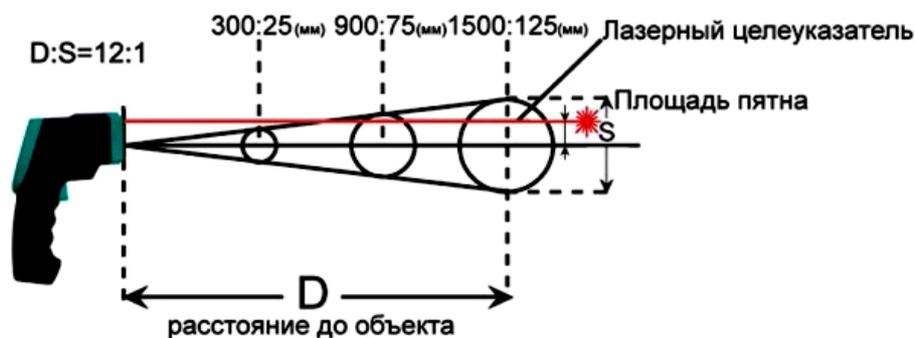


Рис. 4

Пример диаграммы направленности пирометра

Соответственно, диаметр измеряемого пятна определяется оптическим разрешением и зависит от расстояния между пирометром и объектом измерения ($S = k \cdot D$, где k — показатель визирования, D — расстояние до объекта). Минимальный диаметр пятна соответствует наименьшему размеру объекта, который может быть измерен этим пирометром на заданном расстоянии. Чем больше величина оптического разрешения (S/D , хотя иногда используют обратную величину D/S), тем более мелкие предметы может различать пирометр. Точность измерения не зависит от расстояния до объекта до тех пор, пока диаметр измеряемого пятна меньше размера объекта. Если же диаметр пятна становится больше, прибор начинает принимать излучение от других объектов, и это оказывает значительное влияние на результаты измерения.

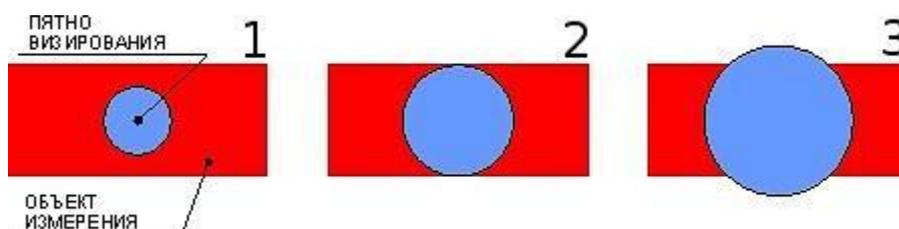


Рис.5

Различные варианты положения пятна визирования

На рисунке 5 приведены различные варианты расположения пятна визирования:

1. правильное — в этом случае точность определяется исключительно характеристиками прибора и не зависит от расстояния;
2. критическое — диаметр пятна равен размеру поверхности объекта, возможно увеличение погрешности измерения;
3. закритическое — точность измерения значительно падает, измерения проводить не рекомендуется.

КОЭФФИЦИЕНТ ИЗЛУЧЕНИЯ ИЛИ ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ

Самые простые модели пирометров имеют фиксированный коэффициент излучения (как правило, он равен 0,95, поскольку на производстве и в быту чаще всего требуется измерение температуры объектов с подобным коэффициентом). Однако при измерении температуры светлых, блестящих, полированных поверхностей и т.п. такие пирометры могут давать значительную погрешность. Чтобы этого избежать, рекомендуется использовать более сложные пирометры с возможностью настройки коэффициента излучения.

Задачей данной работы является нахождение численного значения постоянной Стефана-Больцмана σ и вычисление постоянной Планка h из формулы (9), полученной в квантовой теории теплового излучения и связывающей величины σ , h , постоянную Больцмана k и скорость распространения света в вакууме c .

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}. \quad (9)$$

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В нашей работе нагретым телом, тепловое излучение которого используется для определения σ , служит вольфрамовая нить газонаполненной лампы. Для поддержания нити в нагретом состоянии к лампе подводится мощность

$$W = J \cdot U$$

от регулируемого источника питания постоянного тока. Некоторая часть δ этой мощности расходуется на нагрев держателей спирали, контактов лампы, а также газа, следовательно, мощность, теряемая при тепловом излучении нити, равна

$$J \cdot U (1 - \delta),$$

где J – ток, текущий через лампу; U – напряжение, под которым лампа находится.

Нагретое тело при температуре T излучает энергию, но и поглощает излучение окружающей среды, находящейся при температуре T_0 . Мощность, потребляемая нагретым телом от электрической сети, компенсирует потерю энергии на излучение, которая пропорциональна разности $T^4 - T_0^4$.

Обычно температура нагретого тела, излучающего свет, составляет тысячи градусов, а температура окружающей среды – только сотни градусов.

Пусть, например, $T = 10^3$ К, а $T_0 = 300$ К, тогда

$$T^4 - T_0^4 = 10^9(10^3 - 8,1).$$

Ясно, что $T_0^4 \ll T^4$, и поэтому температурой окружающей среды можно пренебречь.

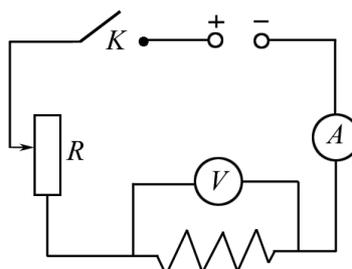


Рис. 6

Учитывая все вышесказанное, для используемой в работе лампы, включенной в электрическую цепь по схеме рис.6, можно записать соотношение:

$$J \cdot U(1 - \delta) = \sigma T_{\text{Э}}^4 \cdot S. \quad (10)$$

Из (10) получаем рабочую формулу для вычисления σ :

$$\sigma = \frac{J \cdot U(1 - \delta)}{T_{\text{Э}}^4 \cdot S}. \quad (11)$$

Для используемой лампы: $\delta = 25$ %, а излучательная поверхность вольфрамовой спирали $S = 30$ мм².

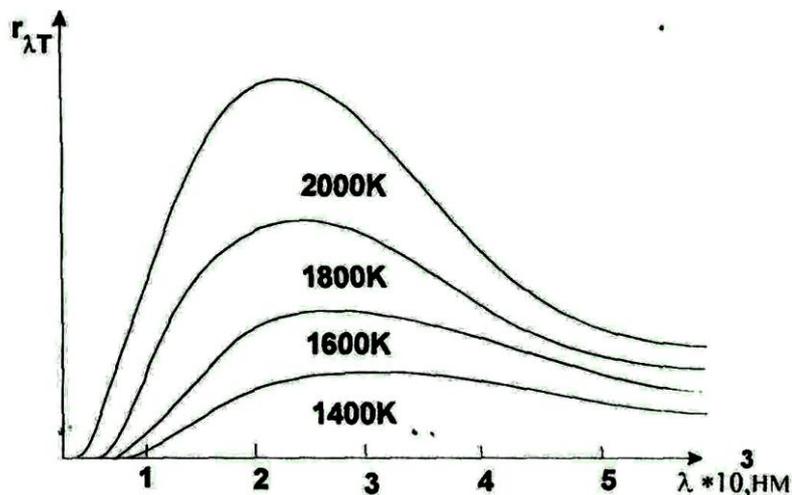


Рис. 7

Зависимость спектральной излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах

Постоянная Стефана-Больцмана была определена опытным путем. Пользуясь известным значением σ , Планк впервые нашел постоянную h , по следующей расчетной формуле:

$$h = 3 \sqrt{\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 \sigma}}$$

ЗАДАНИЕ

1. Определите постоянную Стефана-Больцмана.
2. Определите постоянную Планка.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. На двухканальном регулируемом блоке питания (рис. 8) необходимо все ручки вывести в крайнее левое положение поворотом против часовой стрелки.



Рис. 8

2. Включите прибор в сеть 220 В нажатием кнопки «Power» на лицевой панели прибора.
3. С помощью кнопочного переключателя включите осветительную лампу.
4. Установите в цепи ток 2,9 А с помощью ручек «Current» и «Voltage», расположенных на передней панели блока питания. При этом лампа начинает светиться.
5. Запишите в таблицу 2 показания вольтметра и амперметра.
6. Включите пирометр нажатием кнопки «Питание», расположенной на передней панели прибора.

6. Проведите регулировку окуляра пирометра так, чтобы стала отчетливо видна нить пирометрической лампы. Глядя через оптическую систему пирометра на спираль рабочей лампы, совместите темное пятно пирометра со спиралью этой лампы.
8. В этот момент произведите отсчет по цифровому табло значения энергетической температуры нити пирометра t_3 , °С и запишите в таблицу 2.
9. Установите с помощью блока питания в цепи испытуемой лампы ток в 3,0 А и снова произведите измерение энергетической температуры нити, затем опыт произведите в третий раз, установив в цепи лампы ток в 3,1 А.

Таблица 2

№ опыта	Ток J , А	U , В	t_3 , °С	T_3 , К	T_3 , К ·1,4	S , м ²	σ	$\sigma_{\text{ср}}$	$h_{\text{ср}}$
1	2,9								
2	3,0								
3	3,1								

10. Переведите температуру в градусы Кельвина и умножьте на поправочный коэффициент E , равный 1,4.
11. Вычислите по формуле (11) постоянную Стефана-Больцмана и затем найдите ее среднее значение.
12. Подсчитайте, используя формулу (9), по найденному среднему значению величины $\sigma_{\text{ср}}$ постоянную Планка $h_{\text{ср}}$.
13. Сделайте вывод о возможных ошибках при определении постоянной Стефана-Больцмана и постоянной Планка.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Какое излучение называется тепловым? Что такое тепловое равновесие?
2. Что такое испускательная способность тела и энергетическая светимость? Как они связаны, в каких единицах измеряются?
3. Чем отличается излучение нечерного тела от излучения абсолютно черного тела? Что такое поглощательная способность нечерного тела?
4. Какие тела называются абсолютно черными?

5. Нарисуйте графическую зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны (частоты) для разных температур и объясните ее особенности.
6. Как соотносится равновесное (термодинамическое) излучение и свечение лампы дневного света?
6. Сформулируйте закон Кирхгофа для теплового излучения.
7. Сформулируйте законы Стефана-Больцмана и закон Вина.
8. Сформулируйте квантовую гипотезу Планка для теплового излучения абсолютно черного тела.
9. Докажите, что закон Стефана-Больцмана и закон Вина можно вывести из формулы Планка.
11. Что такое яркостная температура? энергетическая температура?
12. Что такое яркость тела? Как связана яркость с испускательной способностью тела?
13. Поясните вывод соотношения, связывающего истинную температуру с яркостной.
14. Как зависит энергетическая светимость нечерного тела от температуры?
15. Показать, что для $\frac{hc}{kT\lambda} \gg 1$ формула Планка переходит в формулу Вина.
16. Доказать расчетом, что яркость желтого излучения абсолютно черного тела возрастает вдвое при изменении температуры с 1800 К до 1870 К.
17. Как соотносится свечение Вавилова-Черенкова и тепловое излучение?
18. Сколько энергии излучает 1 м^2 абсолютно черного тела при температуре 1 К за 1 с?
19. Дайте понятия селективного и серого тел.
20. Считается, что люминесценция является избытком над тепловым излучением. Поясните это утверждение.
21. Какое излучение называется тепловым? Как соотносится тепловое излучение и, например, тормозное излучение электронов?
22. Каким образом можно измерить температуру тела в инфракрасной области?

23. Объясните, почему энергетическая температура меньше, чем яркостная?
24. Почему пренебрегают температурой окружающей среды T_0 при расчетах энергии излучения?
25. Как можно измерить температуру излучения тела при температуре сжиженного гелия?

ГЛОССАРИЙ

1. **Абсолютно чёрное тело** — физическая идеализация, применяемая в термодинамике, тело, поглощающее всё падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах и ничего не отражающее. Несмотря на название, абсолютно чёрное тело само может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет. Термин был введён Густавом Кирхгофом в 1862 году.
2. **Валентная зона** — энергетическая область разрешённых электронных состояний в твердом теле, заполненная валентными электронами.
3. **Гипотеза** — предположение или догадка; утверждение, предполагающее доказательство, в отличие от аксиом и постулатов, не требующих доказательств.
4. **Зона проводимости** — в зонной теории твердого тела это первая из незаполненных электронами зон (диапазонов энергии, где могут находиться электроны) в полупроводниках и диэлектриках.
5. **Испускательная способность** (лучеиспускательная способность, излучательная способность) – основная характеристика теплового, испускаемого с поверхности нагретого тела, мерой которой является поток энергии излучения, испускаемого за единицу времени с единицы поверхности тела.
6. **Истинная температура тела T** определяется на основе законов теплового излучения Кирхгофа и Планка по формуле:
7. **Люминесценция** — нетепловое свечение вещества, происходящее после поглощения им энергии возбуждения.
8. **Пирометр** – прибор для бесконтактного измерения температуры тел. Принцип действия основан на измерении мощности теплового излучения объекта измерения преимущественно в диапазонах инфракрасного излучения и видимого света.

- 9. Плазма** — частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы.
- 10. Поглощательная способность** тела – отношение поглощаемого телом потока излучения к падающему на него монохроматическому потоку излучения частоты ν .
- 11. Радиационная температура** – физический параметр, характеризующий суммарную (по всем длинам волн) энергетическую яркость B_3 излучающего тела; равна такой температуре абсолютно чёрного тела, при которой его суммарная энергетическая яркость $B_3^0 = B_3$. Радиационная температура равна температуре абсолютно черного тела, при которой его яркость равна яркости излучающего тела
- 12. Рентгеновское излучение** — электромагнитные волны, энергия фотонов которых лежит на шкале электромагнитных волн между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением, что соответствует длинам волн от 10^{-2} до 10^2 Å (от 10^{-12} до 10^{-8} м).
- 13. Селективное тело.** Для большинства прозрачных тел степень поглощения света различных длин волн неодинакова. Благодаря селективному (избирательному) поглощению свет после прохождения через такое тело, изменит свой спектральный состав: лучи некоторых длин волн пройдут почти не изменившись в своей интенсивности, в то время как волны другой длины будут ослаблены чрезвычайно сильно и иногда совсем поглощены. Свет, проходя через среду с селективным поглощением, изменяет не только свою яркость, но и свой спектральный состав и, следовательно, меняет свою окраску.
- 14. Серое тело** — это такое тело, коэффициент поглощения которого не зависит от частоты, а зависит только от температуры. $\alpha_{\omega, T} = \alpha_T < 1$ — для серого тела
- 15. Синхротронное (или магнитотормозное) излучение** — электромагнитное излучение, испускаемое заряженными частицами, движущимися с релятивистскими скоростями по траекториям, искривлённым магнитным полем.
- 16. Тепловое излучение** – электромагнитное излучение, возникающее за счёт внутренней энергии тела. Имеет сплошной спектр, максимум которого зависит от температуры тела. При остывании последний смещается в длинноволновую часть спектра.

- 17. Тепловое равновесие** – термическое равновесие, состояние термодинамической системы, при котором все её части имеют одну и ту же температуру.
- 18. Тормозное излучение** — электромагнитное излучение, испускаемое заряженной частицей при её рассеянии (торможении) в электрическом поле.
- 19. Фонон** – квант энергии упругой волны. Он представляет собой квант колебательного движения атомов кристалла. Это – квазичастица, введённая советским учёным Игорем Таммом по аналогии с квантом электромагнитного поля – фотоном.
- 20. Характеристическое рентгеновское излучение** – электромагнитное излучение, испускаемое при переходах электронов с внешних электронных оболочек атома на внутренние (характеристический спектр).
- 21. Энергетическая температура** (радиационная температура) — физический параметр, характеризующий суммарную (по всем длинам волн) энергетическую яркость излучающего тела. Энергетическая температура равна такой температуре абсолютно чёрного тела, у которого энергетическая светимость равна энергетической светимости тела.
- 22. Энергетическая светимость** — физическая величина, характеризующая мощность оптического излучения, излучаемого малым участком поверхности единичной площади. Энергетическая светимость равна отношению потока излучения $d\Phi_e$, испускаемого малым участком поверхности источника излучения, к его площади dS :

$$R_e = \frac{d\Phi_e}{dS}.$$

Единица измерения в СИ Вт·м⁻².

- 23. Эффект Вавилова — Черенкова** (излучение Вавилова — Черенкова) — свечение, вызываемое в прозрачной среде заряженной частицей, которая движется со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения света в этой среде.
- 24. Цветовая температура** – температура абсолютно черного тела, у которого спектр излучательной способности равен спектру излучательной способности тела. Цветовая температура характеризует относительный вклад излучения данного цвета в излучение источника, т. е. видимый цвет источника.

25. Яркостная температура — фотометрическая величина, характеризующая интенсивность излучения. Яркостная температура – температура абсолютно черного тела, при которой его спектральная излучательная способность и спектральная излучательная способность исследуемого тела равны при некоторой длине волны. Обычно температура светящихся объектов измеряется при длине волн $\lambda = 660$ нм.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. Физика. Ч.3. Оптика. Квантовая физика: Учебное пособие для технических университетов. – Томск: Изд-во Том. ун-та. 2005. – 740 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики.– М. : Наука, 1987 г., т.Ш, параграфы 1-7.
3. Зисман Г. А., Тодес О.М. Курс общей физики.– 1972 г., т. Ш, гл. IX.
4. Ландсберг Г. С. Оптика.– М.: Фитматгиз, 1970 г., С. 682-701, 704-706.