

Лабораторная работа № 18

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ТЕЛ

Введение

Основные характеристики излучающих тел

Тела, нагретые до достаточно высокой температуры, приобретают способность светиться. Тепловое излучение имеет место при любой температуре, однако при невысоких температурах излучаются лишь невидимые глазом инфракрасные лучи.

Электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии излучающего тела и зависящее только от температуры и оптических свойств этого тела, называется тепловым (или температурным) излучением.

Опыт показывает, что тепловое излучение - единственный вид излучения, которое может находиться в равновесии с окружающими телами. Все остальные виды излучения (люминесценция), оказываются неравновесными. Это свойство теплового излучения обусловлено тем, что его интенсивность возрастает с увеличением температуры. А также если энергия, расходуемая телом на тепловое излучение, не восполняется за счет соответствующего количества теплоты, подведенного к телу, то его температура постепенно понижается, а тепловое излучение уменьшается.

Для характеристики излучения используется величина потока энергии, испускаемого за единицу времени с единицы поверхности тела по всем направлениям (в пределах телесного угла 2π), который называют энергетической светимостью тела R_{Σ} . Обозначим поток энергии, испускаемого единицей поверхности тела в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ через dR_{ν} .

$$dR_{\nu} = r_{\nu, T} d\nu. \quad (1)$$

Величина $r_{\nu, T}$ называется испускательной способностью тела. Испускательная способность зависит от частоты и температуры тела. Соответственно, энергетическая светимость является функцией температуры.

Зная испускательную способность, можно вычислить энергетическую светимость:

$$R_э = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu \quad (2)$$

Индекс при $r_{\nu,T}$ показывает, что эта величина является функцией частоты и температуры.

Энергетическая светимость численно равна мощности излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот от 0 до ∞ .

Излучение можно характеризовать вместо частоты ν длиной волны λ . Эти величины связаны простым соотношением $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

Дифференцирование дает $\frac{d\nu}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2}$.

Таким образом,

$$r_\lambda = \frac{c}{\lambda^2} r_\nu. \quad (3)$$

По аналогии с (1) доля энергетической светимости, приходящаяся на интервал $d\lambda$, может быть представлена в виде: $dR_\lambda = r_{\lambda,T} d\lambda$. С помощью (3) можно перейти от r_λ к r_ν и наоборот.

Нагретые тела не только испускают, но и поглощают электромагнитные волны. В качестве спектральной характеристики поглощения принимают обычно поглощательную способность (монохроматический коэффициент поглощения).

Поглощательной способностью тела $a_{\nu,T}$ называют отношение количества поглощенной поверхностью тела энергии $dW_{\text{погл}}$ в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ к общему количеству $dW_{\text{пад}}$ падающего излучения в этом же интервале частот:

$$a_{\nu,T} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} \quad (4)$$

Поглощательная способность $a_{\nu,T}$ – величина безразмерная. Она зависит не только от частоты излучения и температуры тела, но и от природы тела, его формы и состояния поверхности. По определению $a_{\nu,T}$ не может быть больше единицы. Для тела, полностью поглощающего упавшее на него излучение всех частот, $a_{\nu,T} \equiv 1$. Такое тело называют черным.

Тело, способное поглощать всю энергию падающих на него электромагнитных волн независимо от их частоты, поляризации и направления распространения и при любой температуре, называется черным (абсолютно черным) телом.

Абсолютно черных тел, как и других идеализированных объектов, в природе не существует. Некоторые реальные тела (например, сажа, платиновая

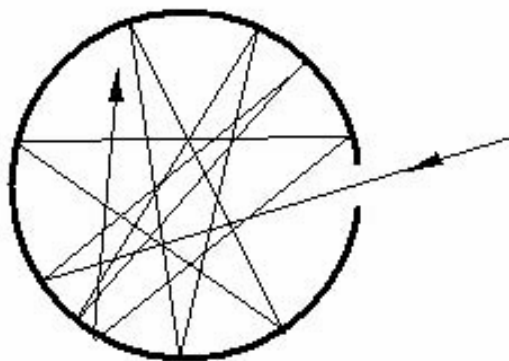


Рис. 1. Модель абсолютно черного тела

чернь, черный бархат и др.) имеют поглощательную способность, близкую к единице, но только в ограниченном интервале частот. Однако искусственно можно создать устройства, излучение которых практически не отличается от излучения абсолютно черного тела.

Наиболее совершенной моделью абсолютно черной поверхности может служить небольшое отверстие в непрозрачной стенке замкнутой полости (см.

рис.1). Электромагнитное излучение, проникшее извне в полость, прежде чем выйти обратно через отверстие, испытывает многократные отражения. При каждом отражении часть энергии поглощается, в результате чего практически все излучение любой частоты поглощается такой полостью.

В теории теплового излучения часто используют еще одну тепловую абстракцию: серое тело.

Тело называют "серым", если его поглощательная способность меньше единицы, но не зависит от частоты излучения, т.е.

$$a_{\nu,T} \equiv a_T = \text{const} < 1.$$

В природе не существует тел, в точности совпадающих по своим свойствам с серыми телами, но для ограниченной области частот (длин волн) тела могут быть близки к серым. Практически "серым" является пламя углеводородов, например ацетилена. Для серого тела распределение энергии излучения совпадает с распределением в спектре абсолютно черного тела, взятого при той же температуре, только мощность излучения с единицы поверхности меньше. Для всех же реальных тел, являющихся не черными и не серыми, поглощательная способность $a_{\nu,T}$ зависит от частоты (длины) волны, от температуры, а также от состояния поляризации лучей и от угла их падения.

Основные законы теплового излучения

Закон Кирхгофа

Между испускательной и поглощательной способностью любого тела имеется определенная связь. Опыт показывает, что тело, обладающее большей испускательной способностью, теряет в единицу времени с единицы поверхности больше энергии, чем тело с меньшим значением $r_{\nu,T}$. Следовательно, тело, испускающее больше энергии, должно и больше поглощать, т.е. обладать большей $a_{\nu,T}$. Таким образом, чем больше испускательная способность $r_{\nu,T}$ тела, тем больше и его поглощательная способность $a_{\nu,T}$.

Кирхгоф сформулировал следующий закон: отношение испускательной и поглотительной способностей не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты (длины волны) и температуры:

$$\frac{r_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} = f(\nu,T). \quad (5)$$

Для абсолютно черного тела $a_{\nu,T} \equiv 1$. Следовательно, из формулы (5) вытекает, что $r_{\nu,T}$ для такого тела равна $f(\nu,T)$. Таким образом, универсальная функция Кирхгофа $f(\nu,T)$ есть не что иное, как испускательная способность абсолютно черного тела - $r_{\nu,T}^0$. Тогда по закону Кирхгофа для нечерного тела испускательная способность $r_{\nu,T}$, отнесенная к единичному интервалу частоты волны, равна

$$r_{\nu,T} = a_{\nu,T} \cdot r_{\nu,T}^0$$

где $a_{\nu,T}$ - поглотительная способность рассматриваемого тела, а $r_{\nu,T}^0$ - испускательная способность абсолютно черного тела при той же температуре и отнесенная к тому же интервалу частот.

Для всех нечерных тел $a_{\nu,T} < 1$ и поэтому: испускательная способность всех нечерных тел меньше, чем испускательная способность абсолютно черного тела при той же температуре. Абсолютно черное тело имеет при данной температуре, максимально возможную испускательную способность.

Закон Стефана-Больцмана

Стефан экспериментально в 1879 году, а Больцман в 1884 году установили, что энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры.

$$R_T^0 = \sigma T^4 \quad (6)$$

На основе опытных данных был определен и коэффициент пропорциональности $\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot град^4}$. Выражение (6) получило название закона Стефана-Больцмана.

Формула Планка

Основная проблема теории теплового излучения – установление явного вида зависимости испускательной способности абсолютно черного тела от частоты и температуры была решена М.Планком в 1900 году. Для этого оказалось необходимым привлечь статистические методы и учесть квантовые свойства вещества и излучения. Согласно квантовым представлениям излучение и поглощение света веществом происходит не непрерывно, а конечными порциями, называемыми квантами света или квантами энергии. Окончательная формула определения испускательной способности абсолютно черного тела имеет вид:

$$r_{\nu,T}^0 = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}, \quad (7)$$

где $h = 1,055 \cdot 10^{-34} Дж \cdot с$ – постоянная Планка, T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана. Формула Планка прекрасно согласуется с опытом.

Оптическая пирометрия

Методы измерения температур на основе законов теплового излучения называются оптической пирометрией. Методы оптической пирометрии пригодны для решения многих практических задач, но, строго говоря, они позволяют измерить истинную (термодинамическую) температуру только для абсолютно черных тел. При измерении оптическим методом температур

нечерных тел, излучающих в условиях отсутствия равновесия, необходимо вводить поправки, учитывающие их свойства.

Яркостной метод

Температура абсолютно черного тела может быть определена по характеру его излучения исходя из любого закона теплового излучения. Наибольшее распространение получил метод определения температур, основанный на сравнении излучения (яркости) светящегося тела с излучением (яркостью) абсолютно черного тела на одном и том же фиксированном участке спектра $d\lambda$. Обычно для этого используется участок спектра, лежащий в окрестности $\lambda = 0,66$ мкм (красная часть спектра). Приборы, применяемые для этой цели, называют яркостными пирометрами. При изготовлении пирометра его калибруют по излучению абсолютно черного тела, нагретого до известных температур.

Для нечерного тела яркостной пирометр дает значение температуры, отличающееся от действительной (термодинамической) величины. Такая температура получила название яркостной.

Яркостной температурой тела T_j называют температуру абсолютно черного тела, испускательная способность которого для длины волны λ равна испускательной способности исследуемого тела для той же длины волны, т.е.

$$r^0(\lambda, T_j) = r(\lambda, T), \quad (8)$$

где T – истинная температура тела. Для всех нечерных тел $T > T_j$.

Из закона Кирхгофа

$$\frac{r_{\nu, T}}{a_{\nu, T}} = f(\nu, T) = r_{\nu, T}^0,$$

с учетом (8) получим поглощательную способность исследуемого тела

$$a_{\nu, T} = \frac{r^0(\nu, T_{\text{я}})}{r^0(\nu, T)}$$

Учитывая что $r_{\lambda} = \frac{c}{\lambda^2} r_{\nu}$, запишем формулу Планка в виде

$$r_{\lambda, T}^0 = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1}$$

тогда

$$a_{\lambda, T} = \frac{r^0(\lambda, T_{\text{я}})}{r^0(\lambda, T)} = \frac{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T_{\text{я}}}\right) - 1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} \quad (9)$$

Значение $a_{\lambda, T}$ для разных тел можно найти в справочниках или определить экспериментально. Из уравнения (9) можно найти для данной длины волны абсолютную температуру исследуемого тела.

Описание лабораторной установки и методики измерений

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для определения постоянной Стефана-Больцмана показана на рис.2.

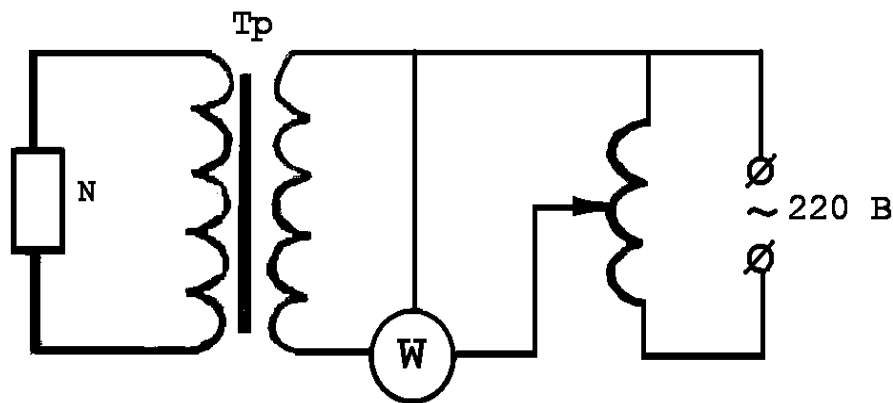


Рис. 2. Электрическая схема установки.

В качестве теплового излучателя используется серое тело – никелевая пластинка, нагреваемая электрическим током. Излучатель \mathbf{N} включается во вторичную обмотку понижающего трансформатора \mathbf{Tr} . На первичную обмотку трансформатора подается переменное напряжение от лабораторного автотрансформатора ЛАТРа, который включается непосредственно в сеть 220 В. Изменяя ЛАТРОм ток в цепи исследуемого тела, получают различную степень его нагретости.

Мощность электрического тока, которая расходуется на поддержание излучателя в накаленном состоянии, измеряется с помощью ваттметра \mathbf{W} . Зная эту мощность P , можно было бы рассчитать энергетическую светимость накаленного тела:

$$R_T = \frac{P}{S},$$

где S – площадь поверхности. Но не вся электрическая мощность P , измеряемая с помощью ваттметра, идет на излучение. Часть ее отводится в виде тепла вследствие теплопроводности токопроводящих проводов и среды, окружающей накаленное тело.

Мощность P_1 , которая непосредственно расходуется на излучение накаленного тела, можно вычислить, умножив P на коэффициент K_1 ($K_1 < 1$), учитывающий потери на теплопроводность:

$$P_1 = K_1 P.$$

Следовательно: $R_T = \frac{P_1}{S}.$

Согласно закону Стефана-Больцмана мощность, идущая на излучение абсолютно черным телом с поверхности площадью S , равна

$$S R_T^0 = S \sigma T^4.$$

С учетом того, что исследуемое тело не является абсолютно черным, оно ежесекундно теряет мощность

$$P^* = K \sigma S (T^4 - T_0^4),$$

где K – степень черноты исследуемого тела.

Приравнявая эту мощность мощности, излучаемой никелевой лентой, получим

$$K_1 P = K \sigma S (T^4 - T_0^4). \quad (10)$$

Для исследуемого серого тела степень черноты K численно равна коэффициенту тепловых потерь K_1 . Тогда постоянную в законе Стефана-Больцмана можно определить так:

$$\sigma = \frac{P}{S (T^4 - T_0^4)}.$$

Описание оптического пирометра

Для измерения температуры накаливаемого тела в данной лабораторной работе используется оптический пирометр ЭОП-66. Работа пирометра основана на измерении квазимонохроматической яркости излучения нагретого объекта путем уравнивания её с яркостью эталона. В качестве эталона яркости в пирометре используется специальная пирометрическая лампа, для которой дана зависимость температуры нити от тока, протекающего по ней. Изображение источника излучения, температуру которого необходимо измерить, с помощью объектива проецируется в плоскости нити пирометрической лампы. Наблюдатель, смотрящий в окулярный микроскоп, видит нить пирометрической лампы на фоне изображения источника излучения. Изменяя силу тока в пирометрической лампе, уравнивают яркость нити лампы с яркостью измеряемого объекта. Температура объекта определяется по градуировке величины тока, протекающего по нити пирометрической лампы в момент уравнивания яркостей нити и изображения объекта. В оптическую схему пирометра (рис. 3) входит двухлинзовый объектив 1, микроскоп 2,

являющийся окуляром пирометра, и пирометрическая лампа 3. Поглощающее стекло 4 установлено на пути светового потока и предназначено для расширения диапазона измеряемых температур. Красные светофильтры 5 служат для монохроматизации светового потока.

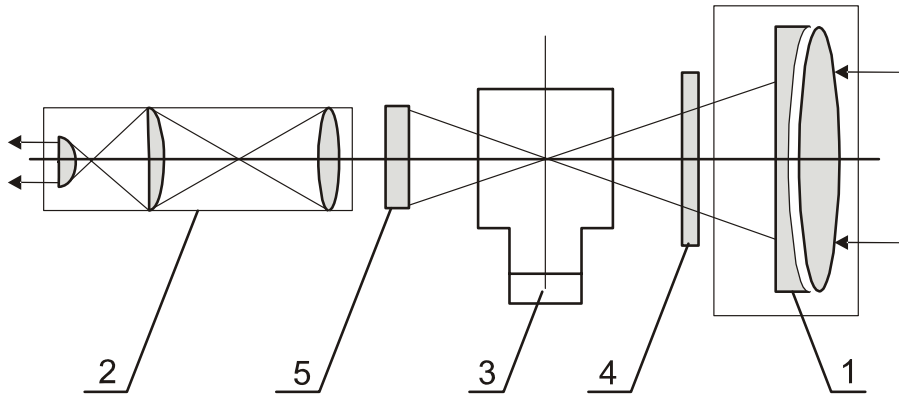


Рис. 3. Схема оптического пирометра.

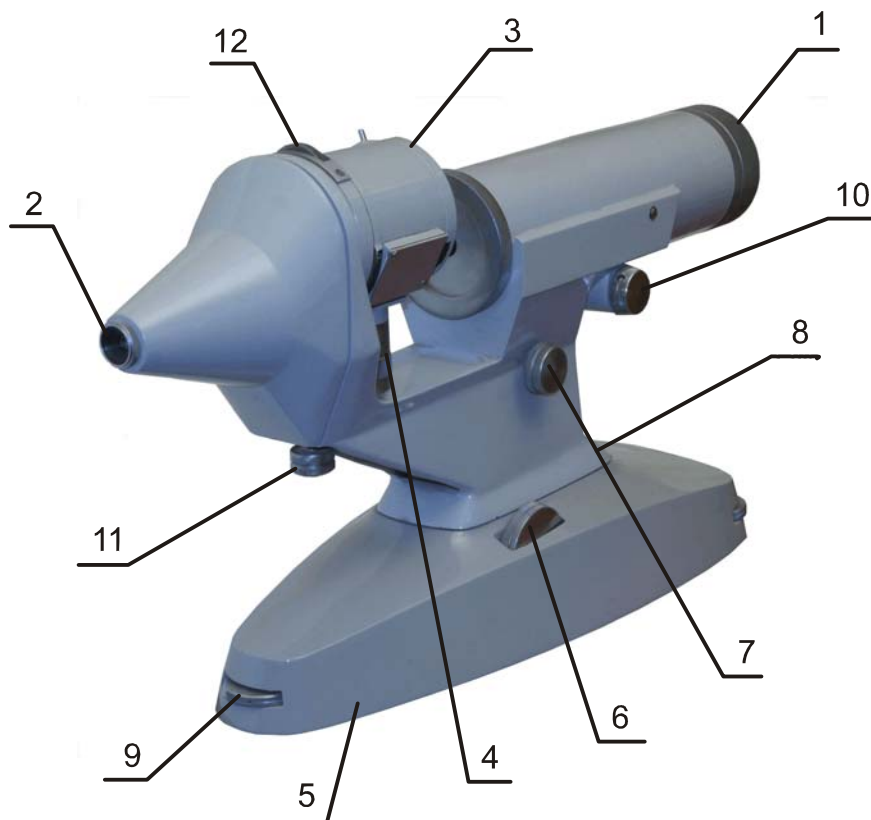


Рис. 4. Общий вид пирометра ЭОП-66

Пирометр ЭОП-66 представляет собой телескоп (рис. 4), состоящий из линзового объектива 1 и окулярного микроскопа 2, оправы которых закреплены в кронштейне. К кронштейну крепится блок ламп 3, в котором помещены три патрона с лампами 4. Телескоп пирометра установлен на массивном основании 5. С помощью барабана 6, при затянутом стопоре 7, телескоп пирометра плавно поворачивается на угол до 25° в горизонтальной плоскости, а ручкой 8 фиксируется в выбранном положении. При необходимости быстрого поворота в горизонтальной плоскости следует ослабить стопор 7 и ручку фиксатора 8, после чего вручную повернуть кронштейн. Основание пирометра 5 имеет винтовые опоры 9, позволяющие наклонять оптическую ось прибора в пределах $\pm 3^\circ$. Для получения четкого изображения объектов, расположенных на различных расстояниях от прибора, объектив пирометра с помощью ручки 10 перемещается вдоль оптической оси. Перемещение окуляра микроскопа 2 вдоль оптической оси обеспечивает необходимую диоптрийную наводку. Поворотом ручки 11 лампы поочередно вводятся в поле зрения окуляра пирометра. Контактная система обеспечивает подключение напряжения только к лампе, находящейся в поле зрения окуляра пирометра. Поворотный механизм кассеты светофильтров 12 обеспечивает введение соответствующих стекол в поле зрения окуляра пирометра, чем обеспечивается монохроматизация светового потока. Положение кассеты обозначается индексами (точками) по окружности кассеты. В первом окне кассеты светофильтров (•) установлено бесцветное стекло, во втором (••) и третьем (•••) окне – красные светофильтры с эффективной длиной волны $(0,65 \pm 0,01)$ мкм, в четвертом – зеленое стекло.

Определение температуры пирометром сводится к субъективному сравнению яркости излучения исследуемого источника с яркостью эталона – нити пирометрической лампы. Если в результате измерений будет достигнуто равенство яркостей, то нить накаливания пирометрической лампы исчезнет (перестанет быть видна) на фоне изображения источника измеряемого излучения.

Мощность нагрева нити накаливания пирометрической лампы является показателем оптической (яркостной) температуры измеряемого объекта \dot{Q}_y . Ее можно определить по градуировочной кривой, либо непосредственно отсчитать по температурной шкале прибора.

Общий вид лабораторной установки показан на рис. 5.

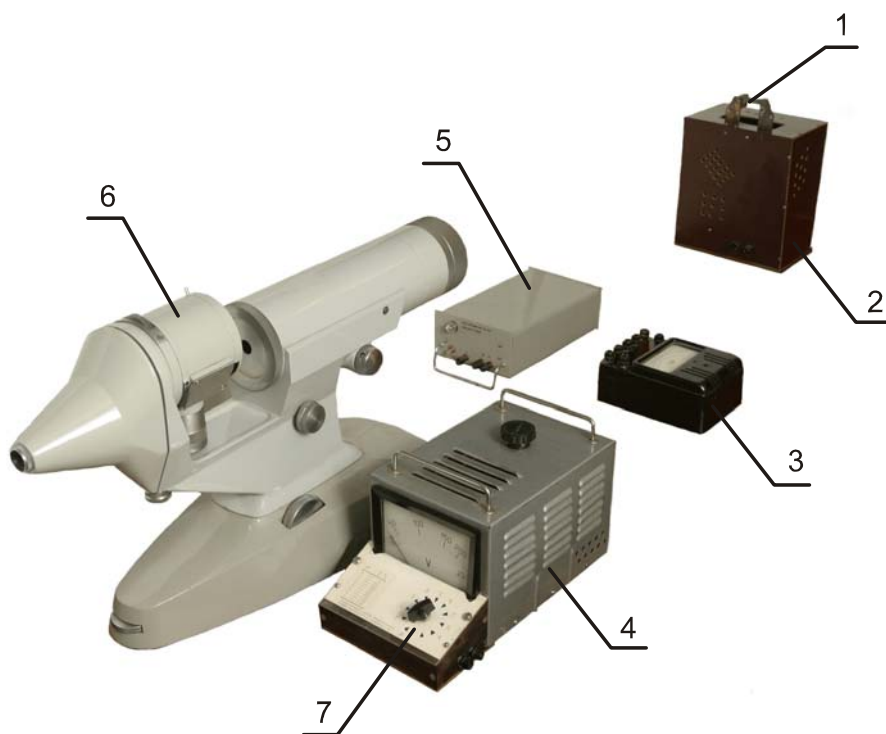


Рис. 5. Общий вид лабораторной установки

1 – никелевая пластинка; 2 – понижающий трансформатор; 3 – ваттметр; 4 – ЛАТР; 5 – источник питания пирометрической лампы; 6 – пирометр; 7 – переключатель температур

Порядок выполнения работы

1. Визуально ознакомиться с установкой. Обратит внимание на то, чтобы рукоятка ЛАТРа была выведена в крайнее левое положение (против часовой стрелки), а переключатель блока фиксированных температур был установлен в положение "0".

2. Ввести в поле зрения окуляра пирометра среднюю (из трех) пирометрическую лампу и, вращая механизм диоптрийной установки, добиться четкого изображения ее нити. Светофильтр в этом случае из поля зрения окуляра лучше вывести (индекс ●).

С помощью рукояток горизонтального и вертикального перемещения пирометра направить телескоп прибора на измеряемый объект и перемещая объектив (ручка 10, рис. 4), добиться резкого изображения объекта. Это можно сделать, если расстояние от телескопа до исследуемого тела не менее 0,7 м.

Внимание! Телескоп прибора, как правило, уже направлен на измеряемый объект и сфокусирован. Если это не так, то лучше обратиться к инженеру лаборатории или преподавателю.

4. Ввести в поле зрения красный светофильтр (индекс ●●).

5. Включить ЛАТР и источник питания пирометрической лампы в сеть 220 В.

6. Установить переключатель блока фиксированных температур в положение "1" и, наблюдая в окуляр, постепенно изменять с помощью ЛАТРа накал никелевой пластинки, до тех пор, пока средний участок (вершина дуги) нити лампы не исчезнет на фоне изображения раскаленной пластинки. В этот момент отсчитать по ваттметру значение излучаемой мощности. Этот результат и значение температуры нити пирометрической лампы записать в таблицу.

Внимание! Так как никелевая пластинка обладает тепловой инерцией, т.е. не сразу достигается равномерный накал, изменять силу тока накала нужно достаточно медленно, чтобы к моменту измерения успевало возникнуть равновесное состояние теплового режима пластинки.

7. Изменить температуру нити пирометрической лампы (переключатель блока фиксированных температур установить в положение "2", "3" и т.д.) и произвести сравнение яркостей и измерение мощности излучения исследуемого тела аналогично описанному в п.6. Результаты измерений записать в таблицу.

8. По окончании измерений вывести рукоятку ЛАТРа в крайнее левое (против часовой стрелки) положение, установить переключатель

фиксированных температур в положении "0", выключить ЛАТР и источник питания пирометрической лампы.

9. Измерить с точностью до 1 мм ширину излучающей пластинки и ее длину L , т.е. расстояние между зажимами, в которых она укреплена. По этим данным рассчитать площадь излучающей поверхности:

$$S \approx 2aL.$$

Толщина пластинки незначительна, поэтому площадью ее торцов можно пренебречь.

10. Для каждой из фиксированных температур вычислить постоянную σ в законе Стефана-Больцмана:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{S(T^4 - T_0^4)}.$$

Найти среднее значение σ и погрешность измерения $\Delta\sigma$:

$$\Delta\sigma = t_{p,n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\sigma} - \sigma_i)^2}{n(n-1)}},$$

где $t_{p,n}$ - коэффициент Стьюдента, $p = 0,95$ – надежность измерения, n – количество независимых значений.

11. Окончательный результат измерений представить в виде:

$$\sigma = \bar{\sigma} \pm \Delta\sigma$$

с указанием единиц измерения.

Таблица для записи результатов экспериментов:

Таблица 1

№, п/п	$t, ^\circ C$	T, K	$W, Вт$	$\sigma, Вт / м^2 \cdot град^4$
1				
2				
...				

Контрольные вопросы

1. Что называется энергетической светимостью тела, испускательной способностью и поглотительной способностью? Каков физический смысл этих понятий?
2. Сформулируйте закон Кирхгофа.
3. Дайте определение абсолютно черного тела. Что понимают под термином "серое тело"?
4. Перечислите основные законы излучения абсолютно черного тела.
5. Сформулируйте основные принципы пирометрии.
6. Как устроен оптический пирометр с исчезающей нитью и каков принцип его действия?
7. Почему яркостная температура тел всегда меньше термодинамической?
8. Почему окна домов в солнечную погоду кажутся темнее стен?

Литература

1. С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. Курс общей физики // СПб.: Издательство "Лань", 2006, т.3, §§ 308-313.
2. Д.В. Сивухин. Общий курс физики // М.: Физматлит, Издательство МФТИ, 2002, т.4, §§ 112-119.