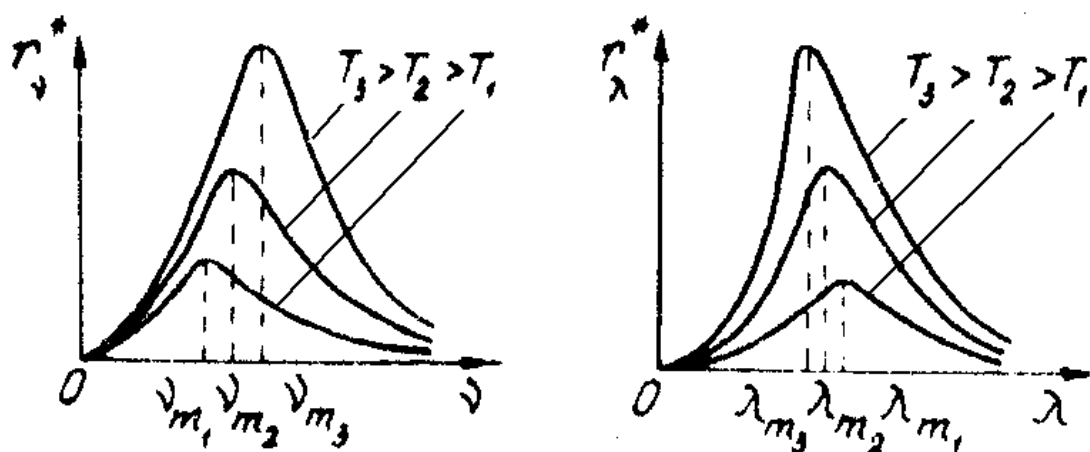


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА С ПОМОЩЬЮ ПИРОМЕТРА

Методические указания
к лабораторной работе



УДК 621.317

Определение постоянной Стефана – Больцмана с помощью пирометра: методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.Е.Малютин, А.П.Соколов. Рязань, 2018. 12 с.

Описано электромагнитное излучение, испускаемое нагретым телом. Изложены кратко теория и метод эксперимента, даны описание экспериментальной установки и рекомендации по выполнению лабораторной работы.

Предназначены для студентов всех специальностей, изучающих дисциплину «Физика».

Табл. 1. Ил. 4. Библиогр.: 4 назв.

Постоянная Стефана – Больцмана, абсолютно черное тело, энергетическая светимость нечерных тел

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра общей и экспериментальной физики РГРТУ
(зав. кафедрой М.В. Дубков)

Определение постоянной Стефана – Больцмана с помощью пирометра

Составители: М а л ю т и н Александр Евгеньевич
С о к о л о в Александр Павлович

Редактор Р.К. Мангутова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 12.03.18. Формат бумаги 60 x 84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 200 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: определение постоянной σ в законе Стефана – Больцмана, а также ознакомление с одним из методов измерения температуры нагретых тел.

Приборы и принадлежности: пирометр ЛОП-72, источник питания эталонной лампы пирометра, исследуемая лампа с вольфрамовой нитью накала, источник питания исследуемой лампы, реостат, два амперметра, вольтметр, графики зависимости $T_{\lambda}(I_{\lambda})$, $a_{\lambda}(T_{\lambda})$ и $k(P)$.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ И МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТА

Электромагнитное излучение, испускаемое нагретым телом и обусловленное возбуждением атомов и молекул тела, называется тепловым (температурным) излучением.

Тепловое излучение (свечение нагретых тел) происходит с поверхности всех тел при любых температурах. Отличительной особенностью теплового излучения является его равновесность. Тепловое излучение – единственное, которое может находиться в термодинамическом равновесии с веществом. При равновесии расход энергии тела на тепловое излучение компенсируется за счет поглощения телом такого же количества энергии падающего на него излучения. Равновесное излучение устанавливается в адиабатически замкнутой системе, все тела которой находятся при одной и той же температуре.

Для количественного описания теплового излучения используются следующие физические термины:

— *излучательная (испускательная) способность, или спектральная плотность энергетической светимости тела*, — физическая величина, численно равная отношению энергии dW равновесного излучения в вакууме с длинами волн от λ до $\lambda+d\lambda$, излучаемой

за единицу времени с единицы площади поверхности тела, к ширине интервала $d\lambda$:

$$r_{\lambda T} = \frac{dW}{d\lambda}; \quad (1)$$

— **энергетическая светимость** R (интегральная излучательная способность) — это физическая величина, численно равная энергии электромагнитного излучения с длинами волн от 0 до ∞ , испускаемой за единицу времени с единицы поверхности тела.

Энергетическая светимость тела R связана с излучательной способностью $r_{\lambda T}$ соотношением

$$R = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda; \quad (2)$$

— **поглощательная способность** $a_{\lambda T}$ является безразмерной величиной, показывающей, какая доля энергии электромагнитных волн в интервале $d\lambda$, падающих на поверхность тела, поглощается им:

$$a_{\lambda T} = \frac{dW_{\text{погл.}}}{dW_{\text{пад.}}} \quad (3)$$

Значение $a_{\lambda T}$ зависит от частоты, температуры, химического состава тела и состояния его поверхности;

— **абсолютно черным телом** называется тело, которое полностью поглощает все падающее на него излучение, ничего не отражая и не пропуская. Для абсолютно черного тела

$$a_{\lambda T}^* \equiv 1. \quad (4)$$

Испускательная способность абсолютно черного тела — $r_{\lambda T}^*$, а его энергетическая светимость — R^* ;

— *серым телом* называется тело, у которого поглощательная способность меньше единицы и не зависит от длины волны света, направления его распространения и поляризации:

$$a_{\lambda T}^{сер} = a_T. \quad (5)$$

Из принципа детального равновесия, по которому энергия, излучаемая за единицу времени с единицы площади поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$, равна поглощенной энергии за то же время на том же участке поверхности:

$$dW_{изл} = dW_{погл}, \quad (6)$$

следует закон Кирхгофа

$$\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} = r_{\lambda T}^*, \quad (7)$$

согласно которому отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела и равно испускательной способности абсолютно черного тела $r_{\lambda T}^*$ при тех же значениях температуры и длин волн.

Из закона Кирхгофа (7) и соотношений (2) и (5) следует, что энергетическая светимость серого тела

$$R = \int_0^{\infty} a_T r_{\lambda T}^* d\lambda = a_T \int_0^{\infty} r_{\lambda T}^* d\lambda, \quad (8)$$

а для абсолютно черного тела при учете соотношений (4) и (8) представляется в виде

$$R^* = \int_0^{\infty} r_{\lambda T}^* d\lambda. \quad (9)$$

Для серого тела вводится понятие интегральной степени черноты a_T , равной интегральной поглощательной способности, которая зависит от материала тела, состояния его поверхности, температуры и

не зависит от длины волны. Тогда энергетическая светимость серых тел

$$R_{\text{Э}} = a_T R^*. \quad (10)$$

Закон Стефана – Больцмана утверждает, что энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$R_{\text{Э}}^* = \sigma T^4, \quad (11)$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана – Больцмана.

Энергетическая светимость нечерных тел

$$R_{\text{Э}} = a_T \sigma T^4. \quad (12)$$

Спектральный состав излучения некоторых металлов и сплавов (никеля, нихрома и др.), покрытых окалиной при нагревании их на воздухе, близок к излучению абсолютно черного тела (рис. 1, кривая 1).

Для серых тел (рис. 1, кривая 2) характер распределения излучения совершенно подобен спектру абсолютно черного тела (рис. 1, кривая 1). Для нечерных тел в спектре излучения и поглощения наблюдаются селективные максимумы (рис. 1, кривая 3).

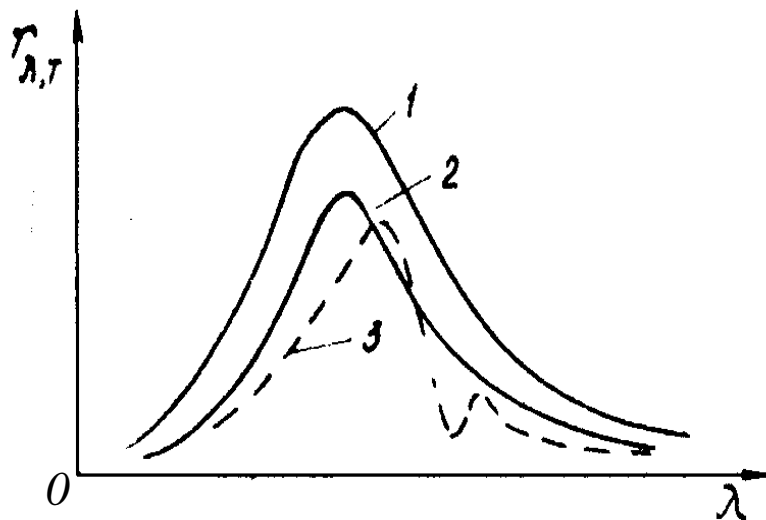


Рис. 1

При увеличении температуры абсолютно черного тела график зависимости его излучательной способности изменяется, как показано на рис. 2. При этом точка максимума смещается в сторону меньших длин волн. Связь длины волны, соответствующей максимуму излучательной способности абсолютно черного тела, с его абсолютной температурой выражается законом Вина

$$T\lambda_m = b, \quad (13)$$

где $b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Если излучение происходит в среде с температурой T_0 , то мощность, передаваемая среде с единицы поверхности тела вследствие излучения,

$$R_{\text{э}} = a_T \sigma (T^4 - T_0^4), \quad (14)$$

а мощность, излучаемая поверхностью площадью S ,

$$R_{\text{э}} S = a_T \sigma S (T^4 - T_0^4).$$

В качестве излучателя в данной работе используется вольфрамовая нить лампы накаливания, нагреваемая электрическим током. Для лампы накаливания $T = 1000 \text{ К}$ и выше, для окружающей среды $T_0 = 300 \text{ К}$, поэтому T_0^4 составит не более 2 % от T^4 , тогда для излучаемой мощности запишем

$$R_{\text{э}} S = a_T S \sigma T^4, \quad (15)$$

где S — полная площадь поверхности вольфрамовой нити.

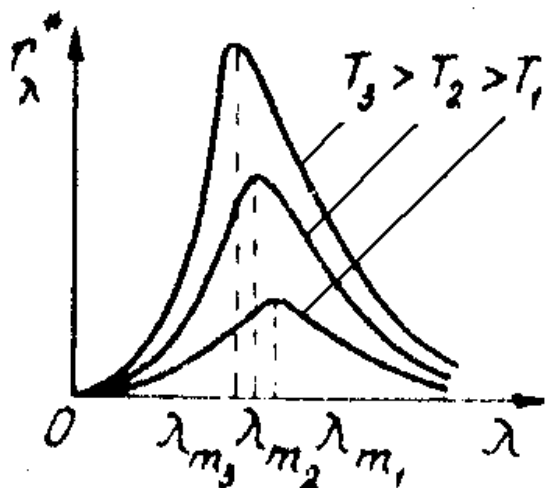


Рис. 2

Мощность тока IU , затрачиваемая на поддержание вольфрамовой нити в накаливаемом состоянии при данной температуре T , компенсирует излучаемую мощность. Но не вся электрическая мощность, измеряемая при помощи амперметра и вольтметра, идет на излучение, так как часть ее отводится в виде тепла вследствие теплопроводности токоподводящих проводов и среды, окружающей накаливаемое тело.

Мощность P_1 , которая расходуется на излучение накаливаемого тела, можно вычислить, умножив IU на коэффициент k , определяемый экспериментально:

$$P_1 = kIU. \quad (16)$$

Здесь $k < 1$ — коэффициент, учитывающий потери мощности за счет теплопроводности. Значения его для данной лампы определяются по графику, находящемуся на установке.

Приравняв kIU к мощности, теряемой вольфрамовой нитью и представленной в соотношении (15) для поверхности S , записываем:

$$kIU = a_T S \sigma T^4.$$

Тогда для определения постоянной Стефана – Больцмана получим следующее соотношение:

$$\sigma = \frac{kIU}{a_T S T^4}, \quad (17)$$

в котором a_T — коэффициент поглощения при данной температуре T , значения которого приведены на графике на установке.

В основе методики определения постоянной σ в законе Стефана – Больцмана — нахождение абсолютной температуры T источника излучения с помощью оптического пирометра с исчезающей нитью, измерение напряжения U вольтметром и величины силы тока I амперметром.

Если бы исследуемое тело было абсолютно черным, то найденная указанным способом температура была бы его истинной температурой, в противном случае она характеризует температуру абсолютно черного тела, имеющего для длины волны 655 нм ту же яркость, что и

исследуемое тело. Поэтому такая температура носит название яркостной температуры тела t_J , °C. Переход к яркостной абсолютной температуре T_J осуществляется по известной формуле

$$T_J = t_J + 273. \quad (18)$$

Зная T_J и спектральный коэффициент черноты a_T (см. прилагаемый к установке график), можно найти истинную абсолютную температуру T тела, вычисляемую по формуле

$$T = \frac{T_J}{1 + \frac{\lambda}{c_2} T_J \ln a_T}, \quad (19)$$

где $c_2 = 1.439 \cdot 10^{-2}$ м·К — постоянная, $\lambda = 6.55 \cdot 10^{-7}$ м — длина волны красного света.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 3. В левой части рисунка приведена схема включения исследуемой лампы накаливания 12 с вольфрамовой нитью, которая состоит из понижающего трансформатора Tr , реостата $R2$, амперметра A и вольтметра V . В правой же части — общий вид и основные узлы пирометра ЛОП-72.

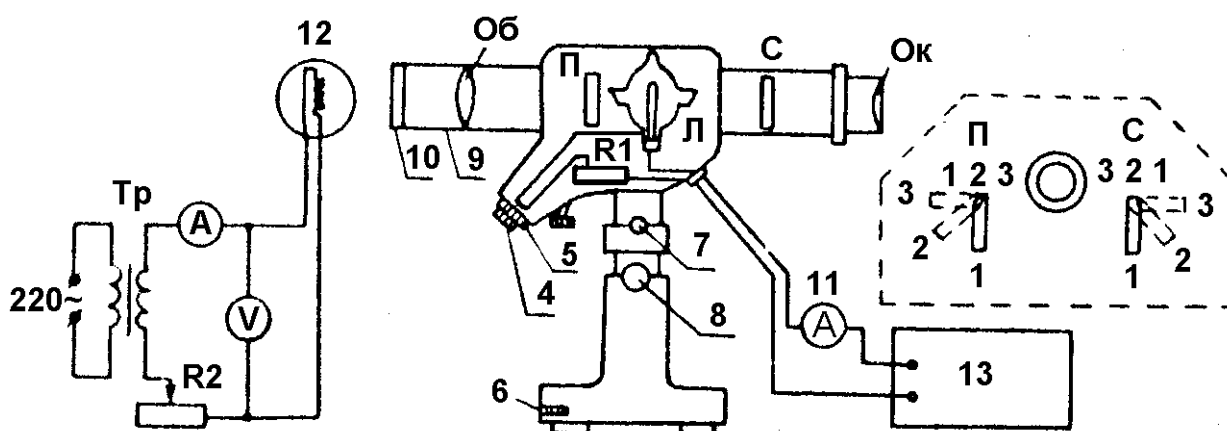


Рис. 3

Пирометр ЛОП-72 построен по классической схеме монохроматического пирометра с исчезающей нитью накала и включает в себя пирометрическую лампу Л, оптическую систему и отдельный источник питания пирометрической лампы 13.

Пирометрическая лампа питается от этого источника током, регулируемым реостатом R1, вмонтированным в корпус пирометра, путем вращения регулировочных колец 4 и 5 для тонкой и грубой регулировки. Регистрация тока осуществляется амперметром 11. Для изменения высоты и наклона оптической оси пирометра предназначены ручки 6, 7, 8. Перемещение объектива Об осуществляется вращением трубы 9. Для предохранения объектива от повреждений используется защитная крышка 10.

Оптическая схема пирометра приведена на рис. 4. В фокусе объектива Об помещена пирометрическая лампа Л с нитью накала, изогнутой в форме полукруга. Окуляр Ок позволяет одновременно наблюдать среднюю часть нити пирометрической лампы и изображение поверхности исследуемого нагретого тела, расположенного в фокальной плоскости объектива. Получение резкой видимости нити пирометрической лампы осуществляется перемещением окуляра Ок, а резкости изображения поверхности исследуемого тела — перемещением объектива Об. Между пирометрической лампой Л и окуляром Ок помещен красный светофильтр С, который пропускает почти монохроматическую часть света с длиной волны 655 нм, испускаемого телом и нитью. Между объективом Об и лампой Л для измерения высоких

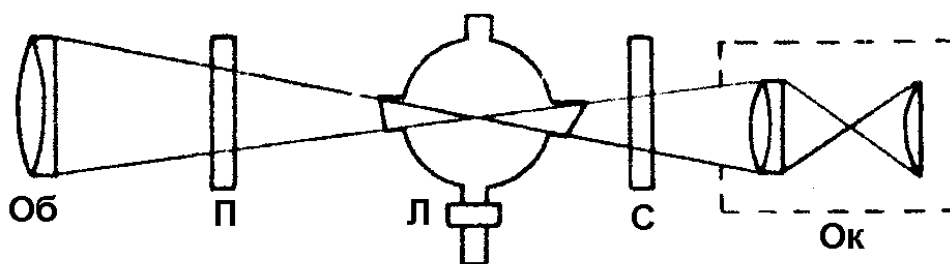


Рис. 4

(свыше $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур вводятся поглотители П. Выбор светофильтров и поглотителей производится трехпозиционными переключателями (рис. 3).

Пирометр предназначен для измерения яркостной температуры нагретых тел по их тепловому излучению в видимой области спектра в свете эффективной длины волны $655\pm 1\text{ нм}$. Диапазон измеряемых температур от 900 до $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Измерение температуры выше $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ осуществляется с помощью поглотителей.

Наблюдая нить пирометрической лампы на фоне раскаленного тела, регулируют ток нити до тех пор, пока нить станет невидимой на фоне изображения раскаленного тела, что происходит при равенстве яркостей изображения раскаленного тела и нити. По показаниям амперметра 11, включенного в цепь пирометрической лампы, используя график, прилагаемый к установке, можно узнать, какой температуре абсолютно черного тела соответствует излучение исследуемого тела.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовка установки к работе.
 - 1.1. Ознакомиться с устройством, принципом действия и назначением ручек управления пирометром. Вывинтить защитную крышку 10 объектива Об (рис. 3).
 - 1.2. Установить исследуемую лампу на расстоянии $0.8\div 1\text{ м}$ от пирометра.
 - 1.3. Поворотом регулировочного кольца 4 (рис. 3) до упора вправо ввести полностью реостат пирометра R1 в цепь пирометрической лампы. Кольцо 5 установить в среднее положение между крайними (левым и правым) положениями.
 - 1.4. Включить вилку шнура блока питания пирометрической лампы в сеть 220 В .

- 1.5. Глядя в окуляр Ок пирометра, медленно вращая кольцо 4 влево, добиться такого положения, при котором нить пирометрической лампы стала бы заметно светиться.
- 1.6. Перемещением окуляра Ок добиться четкого изображения нити пирометрической лампы.
- 1.7. Включить источник питания исследуемой лампы в сеть 220 В и увеличением тока в цепи с помощью реостата R2 обеспечить видимое свечение лампы.
- 1.8. Произвести наводку пирометра на нить исследуемой лампы. При этом нужно добиться такого положения, чтобы изображения средних частей нитей пирометрической и исследуемой ламп пересекались. Это достигается путем изменения высоты подставки, на которой крепится лампа, а также путем вращения ручек 6, 7, 8, служащих для изменения высоты и наклона оптической оси пирометра. Наводка на резкость изображения нити исследуемой лампы осуществляется вращением трубы 9.
2. Проведение измерений и обработка результатов
- 2.1. Для записи результатов измерений и расчетов составить таблицу.

| № п/п | U, В | I, А | I _э , А | <I _э >, А | T _я , К | a _T | P, В _T | k | T, К | σ, В _T /м ² ·К ⁴ |
|----------|------|------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------|-------------------|---|------|---|
| 1 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

- 2.2. Установить сектор светофильтров С и сектор поглотителей П в положения 2 (см. рис. 3).
- 2.3. Установить некоторое напряжение U накала исследуемой лампы в пределах от 6 до 9 В и определить соответствующий ток накала I .
- 2.4. Вращая регулировочные кольца 4 и 5 (см. рис. 3), уравнивать яркости нитей исследуемой и пирометрической ламп по исчезновению темной или светлой полосы в месте их пересечения. Снять показания амперметра 11 пирометра и значение показываемого им тока I_3 занести в таблицу.
- 2.5. Провести измерения по п.2.4 три раза и определить среднее значение тока пирометра $\langle I_3 \rangle$.
- 2.6. Повторить измерения по пунктам 2.3–2.5 для еще двух значений напряжения U накала исследуемой лампы в указанном диапазоне.
- 2.7. Определить для всех опытов яркостную температуру $T_{\text{я}}$, используя кривую калибровочного графика (см. приложение 1) и найденные значения среднего тока пирометра $\langle I_3 \rangle$.
- 2.8. Для найденных значений $T_{\text{я}}$ определить по графику в приложении 2 коэффициент поглощения вольфрама $a_{\text{т}}$.
- 2.9. Вычислить мощность, потребляемую лампой, по формуле $P = I \cdot U$.
- 2.10. Определить коэффициент k , учитывающий потерю мощности за счет теплопроводности, используя график приложения 3 и найденные значения мощности. Все три приложения находятся на рабочем месте.
- 2.11. Определить истинную температуру по формуле (19).
- 2.12. Рассчитать постоянную Стефана – Больцмана по формуле (17), в которой $S = (8.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ — полная площадь поверхности нити накала исследуемой лампы.
- 2.13. Используя три полученных значения, определить среднее значение и рассчитать погрешность измерения постоянной Стефана – Больцмана.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое тепловое излучение и каковы его свойства?
2. Дайте определения энергетической светимости и ее спектральной плотности. Как они связаны друг с другом?
3. Что такое поглощательная способность? Какие тела называются абсолютно черным и серым?
4. Сформулируйте и выведите закон Кирхгофа.
5. Сформулируйте закон Стефана – Больцмана.
6. Сформулируйте закон смещения Вина. Постройте зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах.
7. Что такое оптическая пирометрия? На какие группы подразделяются пирометры?
8. Что понимают в оптической пирометрии под радиационной, яркостной и цветовой температурой?
9. Каковы устройство и принцип действия оптического пирометра с исчезающей нитью?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. – 9-е изд., стер. – М.: Академия, 2014. – 720 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – 20-е изд., стер. – М.: Академия, 2014. – 560 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики в 4-х томах.- Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: учеб. пособие / И.В.Савельев; под общ. ред. В.И. Савельева. – 2-е изд., стер. –М.: КНОРУС, 2012. – 576 с.
4. Ландсберг Г.С. Оптика: учеб. пособие для вузов. – 6-е изд., стер. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.