

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Физика»

## **ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Методические указания к лабораторной работе по физике  
для студентов инженерно-технических специальностей

*Учебное электронное издание*

**Минск 2011**

УДК. 530.1 (075.8)

**Авторы:**

*П.Г. Кужир, А.А. Иванов, И.А. Климович, В.А. Потачиц, С.В. Попко*

**Рецензенты:**

*Ю.В. Развин*, доцент кафедры «Экспериментальная и теоретическая физика» БНТУ, кандидат физико-математических наук;

*И.Д. Феранчук*, заведующий кафедрой «Теоретическая физика» БГУ, доктор физико-математических наук, профессор

В методических указаниях приведены основные законы теплового излучения. Издание предназначено для студентов инженерно-технических специальностей всех видов обучения.

Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел (017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37  
Регистрационный № БНТУ/ФЭС 57-9.2011

© Кужир П.Г., Иванов А.А., Климович И.А.,  
Потачиц В.А., Попко С.В., 2011  
© Федорова Е.Л., компьютерный дизайн, 2011  
© БНТУ, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ПОНЯТИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	4
2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
3. ЗАКОН КИРХГОФА.....	6
4. ЗАКОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА .....	8
5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	11
5.1. Устройство и работа лабораторной установки.....	11
5.2. Подготовка лабораторной установки к работе .....	12
Задание 1. Получение кривых излучения серого тела для трех температур .....	13
Задание 2. Проверка справедливости закона смещения Вина .....	14
Задание 3. Проверка закона Стефана-Больцмана .....	14
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	15
ЛИТЕРАТУРА .....	15

### Цель работы:

- изучить основные закономерности теплового излучения;
- построить кривые излучения нагретой нихромовой спирали, проверить выполнение закона смещения Вина и закона Стефана-Больцмана.

**Используемое оборудование:** лабораторная установка для измерения энергии излучения нихромовой нити в узком спектральном интервале при фиксированной температуре излучателя.

## 1. ПОНЯТИЕ ТЕПЛОвого ИЗЛУЧЕНИЯ

Излучение телами электромагнитных волн происходит в результате перехода атомов и молекул из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. Излучение тела сопровождается потерей энергии. Для того чтобы излучение происходило длительное время, необходимо компенсировать убыль энергии путем возбуждения излучения. Возбуждать излучение можно разными способами: за счет химических реакций (хемилюминесценция), облучением (фотолюминесценция), при электрическом воздействии (электролюминесценция), при бомбардировке электронами (катодолюминесценция) и др. Можно заставить тело излучать электромагнитные волны, сообщая ему энергию путем нагревания.

Электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии излучающего тела и зависящее от температуры и оптических свойств этого тела, называется *тепловым излучением*.

Если энергия, расходуемая телом на тепловое излучение, не восполняется за счет соответствующего количества теплоты, подведенного к телу, то его температура постепенно понижается, а интенсивность теплового излучения уменьшается. Свечение твердых и жидких тел характеризуется сплошным (непрерывным) спектром излучения, в основном в видимой и инфракрасной области.

Поместим нагретое тело в замкнутую полость с зеркальными стенками. Электромагнитное излучение от тела будет падать на стенки полости, многократно отражаться от них, снова падать на тело и поглощаться им. Будет происходить непрерывный обмен энергией между телом и излучением, находящимся в полости. За счет процессов излучения и поглощения в полости установится *термодинамическое равновесие*, а *излучение* становится *равновесным*, при котором за каждый промежуток времени количество излученной энергии определенных длины волны, направления и поляризации в среднем равно количеству поглощенной энергии той же длины волны, направления распространения и поляризации. Равновесное излучение однородно, изотропно, неполяризовано и его характеристики определяются только температурой.

Тепловое излучение – единственный вид излучения, которое может находиться в равновесии с излучающими телами. Это обусловлено тем, что с ростом температуры тела увеличивается интенсивность теплового излучения, а с понижением – уменьшается.

## 2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*Энергетической характеристикой теплового излучения является поток излучения  $\Phi$ , представляющий собой количество энергии, переносимой электромагнитными волнами в единицу времени через данную поверхность.* Единицей измерения потока излучения является Ватт (Вт).

$$\Phi = \frac{W}{t},$$

где  $W$  – количество энергии;  
 $t$  – время излучения.

Поток излучения в интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ , отнесенный к величине этого интервала, называется *спектральным монохроматическим потоком излучения  $d\Phi_\lambda$*

$$d\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}.$$

*Энергетической светимостью* называется физическая величина  $R_T$ , численно равная энергии, испускаемой за единицу времени с единицы площади поверхности тела во всем интервале длин волн по всем направлениям.

$$R_T = \frac{\Phi}{S}, \quad [R_T] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь тела.

Энергетическая светимость является функцией температуры и зависит от свойств излучающего тела.

*Излучательной способностью или спектральной плотностью энергетической светимости  $r_{\lambda,T}$*  называется физическая величина, численно равная энергии, излучаемой в единицу времени с единицы поверхности тела в интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ , отнесенной к величине этого интервала

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_T}{d\lambda}, \quad [r_{\lambda,T}] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}, \quad (2)$$

следовательно

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda. \quad (3)$$

Пусть на элементарную площадку непрозрачного тела  $dS$  падает монохроматический поток энергии  $d\Phi_\lambda$ . Поток частично поглощается телом, а частично отражается от него. Согласно закону сохранения энергии будет иметь место соотношение

$$d\Phi_\lambda = d\Phi'_\lambda + d\Phi''_\lambda,$$

где  $d\Phi'_\lambda$  – часть потока, поглощенная телом;

$d\Phi''_\lambda$  – часть потока, отраженная телом.

Отношение поглощенной части потока ко всему потоку лучистой энергии, падающей на тело, называется *поглощательной способностью*  $a_{\lambda,T}$ .

$$a_{\lambda,T} = \frac{d\Phi'_{\lambda,T}}{d\Phi_{\lambda,T}} \leq 1. \quad (4)$$

Очевидно, что  $a_{\lambda,T}$  – безразмерная величина.

### 3. ЗАКОН КИРХГОФА

Тело называется *черным (абсолютно черным телом)*, АЧТ, если оно при любой неразрушающей температуре полностью поглощает всю энергию падающих на него электромагнитных волн независимо от их частоты, поляризации и направления распространения. Следовательно, коэффициент поглощения черного тела тождественно равен единице. Спектральную плотность энергетической светимости черного тела обозначим  $r_{\lambda,T}^0$ . Она зависит только от длины волны излучения и термодинамической температуры  $T$  тела.

Все реальные тела не являются абсолютно черными. Однако некоторые из реальных тел в определенных интервалах частот по своим свойствам близки к АЧТ. Например, в области частот видимого света коэффициенты поглощения сажи, платиновой черни и черного бархата мало отличаются от единицы. Наиболее совершенной моделью черного тела может служить небольшое отверстие  $O$  в непрозрачной стенке замкнутой плоскости (рис. 1).

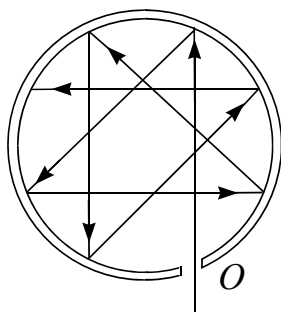


Рис. 1. Модель АЧТ

Луч света, попадающий внутрь полости через отверстие  $O$ , претерпевает многократные отражения от стенок полости, прежде чем он выйдет из полости обратно. При каждом отражении происходит частичное поглощение энергии света стенками. Поэтому независимо от материала стенок интенсивность света, выходящего из полости через отверстие  $O$ , во много раз меньше интенсивности падающего извне первичного излучения. Очевидно, что эта модель тем ближе по характеристикам к черному телу, чем больше отношение площади поверхности полости к площади отверстия.

Рассмотренная модель черного тела позволяет легко понять, почему узкий вход в пещеру или открытые окна домов снаружи кажутся черными, хотя внутри пещеры около входа или в комнатах дома достаточно светло из-за отражения дневного света от стен. Шероховатые ткани с большим ворсом обладают большим коэффициентом поглощения, чем гладкие.

Испуская электромагнитные волны, а также частично поглощая падающие на них волны, тела способны обмениваться энергией. ***Самопроизвольный процесс передачи энергии в форме теплоты от более нагретого тела к менее нагретому путем излучения и поглощения электромагнитных волн называется теплообменом излучением или радиационным теплообменом.*** Теплообмен излучением в отличие от теплообмена при конвекции и теплопроводности может осуществляться между телами, находящимися не только в какой-либо среде, но и в вакууме.

Рассмотрим теплоизолированную систему тел, находящихся в состоянии термодинамического равновесия. Температуры всех тел такой системы одинаковы и не изменяются с течением времени, а их излучение – равновесное. Следовательно, для любого тела энергия  $dW_{\text{изл}}$ , излучаемая в единицу времени с единицы площади поверхности, должна быть равна  $dW_{\text{погл}}$ , поглощаемой за то же время этим участком поверхности тела за счет падающего на него излучения:

$$dW_{\text{изл}} = dW_{\text{погл}} \quad (5)$$

Нарушение условия (5) противоречит второму закону термодинамики, согласно которому невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме теплоты от тела менее нагретого к телу более нагретому. В самом деле, если, например  $dW_{\text{изл}} > dW_{\text{погл}}$ , то тело охлаждается, а вследствие этого какие-то другие тела системы нагреваются. Поскольку вначале температуры всех тел системы были одинаковы, температура охлаждающегося тела должна стать меньше температуры нагревающихся тел системы. При  $dW_{\text{изл}} < dW_{\text{погл}}$  соотношение температур будет обратным. Таким образом, при  $dW_{\text{изл}} \neq dW_{\text{погл}}$  удалось бы осуществить самопроизвольный процесс (теплообмен излучением), единственным результатом которого передача энергии в виде теплоты от холодного тела к более нагретому. Второй закон термодинамики исключает возможность такого процесса.

Поместим в замкнутую изотермическую оболочку несколько тел с различными значениями температуры, поглотательной и излучательной способностями. Тела с бóльшей излучательной способностью будут терять в единицу времени за счет излучения больше энергии, чем тела с меньшей излучательной способностью. В результате спустя некоторое время все тела примут одинаковую температуру  $T$ . Внутри полости установится термодинамическое равновесие. Для его поддержания необходимо, чтобы тела с большей излучательной способностью обладали пропорционально большей поглотательной способностью для той же длины волны.

Исходя из законов термодинамики, немецкий ученый Густав Кирхгоф в 1860 г. установил закон, носящий его имя.

Закон Кирхгофа гласит: *отношение излучательной способности тела к его поглотательной способности одинаково для всех тел, не зависит от их природы и является универсальной функцией длины волны излучения и температуры.*

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_3 = \dots = f(\lambda, T), \quad (6)$$

где индексы 1, 2, 3 ... обозначают различные тела.

Для абсолютно черного тела  $a_T = 1$ . Следовательно, согласно (6)

$$r_{\lambda,T}^0 = f(\lambda, T),$$

где  $r_{\lambda,T}^0$  – излучательная способность АЧТ.

При данной температуре АЧТ имеет максимальную излучательную способность по сравнению с другими телами, поэтому его называют полным излучателем.

*Тело, у которого  $a_T < 1$ , а коэффициент поглощения одинаков для всех частот и зависит только от температуры, рода материала и состояния поверхности, называется серым телом.*

#### 4. ЗАКОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА

После установления закона Кирхгофа стало очевидным, что первоочередная задача теории теплового излучения состоит в нахождении вида функции Кирхгофа,  $f(\lambda, T)$  т.е. в выяснении вида зависимости энергетической светимости  $r_{\nu}^0$  черного тела от температуры  $T$  и длины волны излучения  $\lambda$ . Однако сначала удалось решить более простую задачу – найти зависимость энергетической светимости  $R_T^0$  черного тела от его температуры. Л. Больцман, применив термодинамический ме-



тод к исследованию черного излучения, теоретически показал (1884), что *энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры:*

$$R_T^0 = \sigma T^4, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – *постоянная Стефана-Больцмана*, в системе СИ

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / м}^2 \cdot \text{К}^4.$$

Этот закон получил название закона Стефана-Больцмана, так как Д. Стефан на основе анализа экспериментальных данных пришел (1879) к аналогичному выводу.

Значительно более сложной оказалась задача определения вида функции Кирхгофа  $r_{\lambda, T}^0$ , т.е. выяснения спектрального состава излучения черного тела. Решение этой задачи вышло далеко за рамки теории теплового излучения и сыграло огромную роль во всем дальнейшем развитии физики, так как привело к установлению квантового характера излучения и поглощения энергии атомами и молекулами.

Вид распределения излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны для различных значений температуры представлен на рис. 2. Попытки теоретически объяснить поведение кривых с позиции классической физики не дали положительных результатов, так как при этом предполагалось, что энергия излучения может принимать любые значения.

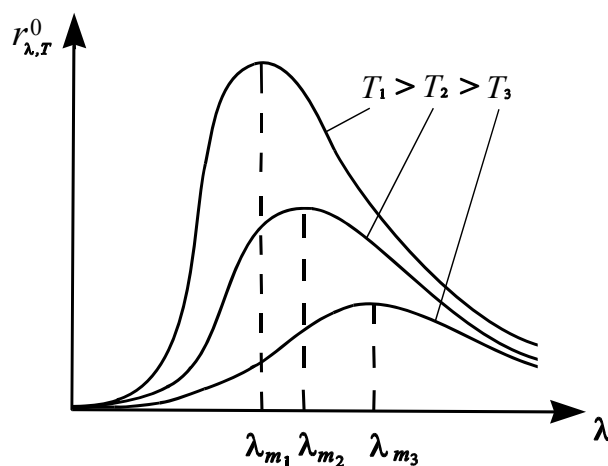


Рис. 2. Вид зависимостей излучательной способности АЧТ от длины волны для разных значений температур

Проанализируем вид этой кривой. Видно, что АЧТ испускает энергию неравномерно во всем диапазоне волн: на длинноволновое и коротковолновое приходится малая энергия, а на некоторой длине волны  $\lambda_m$  АЧТ испускание энергии максимально.

При повышении температуры кривая зависимости  $r_{\lambda,T}^0(\lambda)$  смещается в область меньших длин волн, т.е. более горячие тела испускают больше коротковолнового излучения.

Пик графика при повышении температуры становится более острым, высоким и смещается в область малых длин волн.

Математически эти утверждения выражаются двумя **законами Вина**:

Первый закон Вина (закон смещения): **длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум излучательной способности излучения АЧТ, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:**

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

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

Второй закон Вина: **Максимальное значение излучательной способности АЧТ пропорционально пятой степени его абсолютной температуры:**

$$r_{\lambda,T_{max}}^0 = r_{\lambda,T}^0(\lambda_m) \sim T^5.$$

Макс Планк допустил, что поглощение и испускание энергии атомами происходит не непрерывно, а отдельными порциями – квантами, величина энергии которых зависит от частоты (или длины волны) излучения:

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda},$$

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

$\nu$  – частота излучения;

$\lambda$  – длина волны.

Формула Планка (1900 г.) для АЧТ имеет вид:

$$r_{\lambda,T}^0 = 2\pi c^2 h \lambda^{-5} \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1}. \quad (8)$$

Формула (8) хорошо согласуется с опытными данными. Проинтегрировав формулу (8) по всему спектральному диапазону длин волн от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$ , исполь-

зую формулу (3) с учетом формулы (8), получим выражение для энергетической светимости АЧТ

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

Продифференцировав (8) по  $\lambda$  и исследовав функцию  $r_{\lambda,T}^0$  на экстремум, получим

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (9)$$

где  $\lambda_m$  – длина волны излучения, на которую приходится максимум излучательной способности  $r_{\lambda,T}^0$  при температуре  $T$ .

Соотношение (9) совпадает с экспериментальным *законом смещения Вина*.

Площадь под графиком на рисунке 2 равна  $\int_0^\infty r_{\lambda,T}^0 d\lambda$  и равна энергетической светимости АЧТ, т.е. определяется как

$$\int_0^\infty r_{\lambda,T}^0 d\lambda = R_T^0 = \sigma T^4.$$

Излучение реальных тел отличается от излучения АЧТ. Для серых тел с коэффициентом  $\alpha_T$  имеем:

$$R_T = \alpha_T R_T^0 = \alpha_T \sigma T^4. \quad (10)$$

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

### 5.1. Устройство и работа лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для измерения энергии, излучаемой нихромовой спиралью, в узком спектральном интервале при фиксированном значении температуры излучателя. Выделение узких участков спектра излучения осуществляется набором оптических инфракрасных фильтров (ИК-фильтров).

Установка состоит из следующих частей (рис. 3): 1 – отражатель; 2 – фотоприемник; 3 – блок оптических ИК-фильтров; 4 – излучатель; 5 – модулятор; 6 – источник тока; 7 – блок питания; 8 – электронный блок обработки сигнала фотоприемника; 9 – вольтметр цифровой.

Вид лабораторной установки спереди приведен на рис. 4.

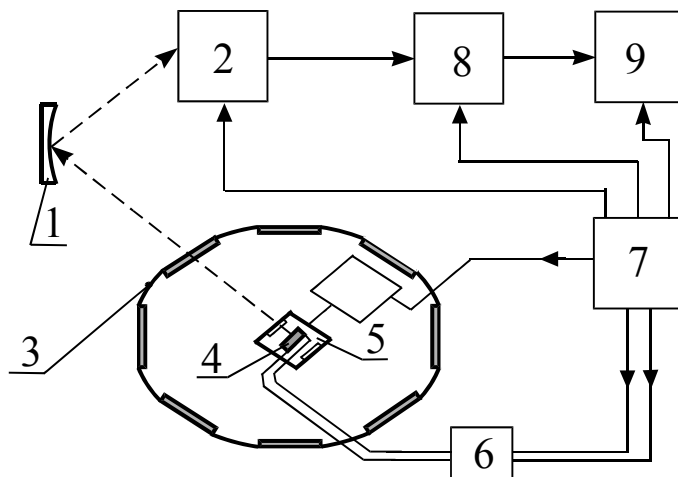


Рис. 3. Структурная схема лабораторной установки

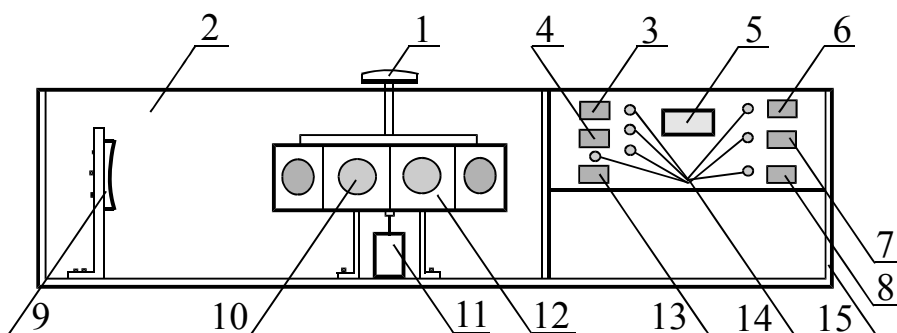


Рис. 4. Вид лабораторной установки спереди:

1 – ручка барабана блока фильтров; 2 – прозрачный кожух; кнопка МОДУЛЯТОР;  
 4 – кнопка ДИАПАЗОН; 5 – светодиодный цифровой индикатор; 6 – кнопка ТЗ;  
 7 – кнопка Т2; 8 – кнопка Т1; 9 – зеркало; 10 – инфракрасный узкополосный  
 фильтр; 11 – электродвигатель модулятора; 12 – барабан блока фильтров; 13 –  
 кнопка СЕТЬ; 14 – сигнальные светодиоды; 15 – корпус

## 5.2. Подготовка лабораторной установки к работе

1. Проверьте исходное положение тумблеров управления, расположенных на передней панели:

- кнопки СЕТЬ и МОДУЛЯТОР должны находиться в отжатом (выключенном) положении;
- кнопка ДИАПАЗОН должна находиться в отжатом положении (диапазон 1);
- кнопка Т1 должна находиться в нажатом (включенном) положении, а кнопки Т2 и Т3 – в отжатом (выключенном) положении.

2. Положение барабана блока фильтров – произвольное.

3. Включите установку в сеть.

4. Нажмите кнопку СЕТЬ. При этом должны загореться сигнальные светодиоды, расположенные рядом с кнопками СЕТЬ, ДИАПАЗОН (x1) и T1. На трехразрядном светодиодном индикаторе должна высветиться комбинация 0,00 или 0,01.

5. Выждите 15 минут, необходимые для прогрева установки.

Во время прогрева установки подготовьте таблицу для записи результатов измерений.

Номера фильтров	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda_{\max}$ , мкм	2,08	2,5	3,2	3,9	4,6	6,2	8,4	2-20
$U_{R,\lambda, T_1}$ , В								
$U_{R,\lambda, T_2}$ , В								
$1/3 U_{R,\lambda, T_3}$ , В								
$U_{R,\lambda, T_3}$ , В								

### Задание 1

#### Получение кривых излучения серого тела для трех температур

1. Поворотом рукоятки блока фильтров по часовой стрелке установить в рабочее положение фильтр № 1.

2. Включить двигатель модулятора, нажав на кнопку МОДУЛЯТОР (до окончания измерений не выключать).

3. Снять показания с цифрового индикатора и занести в таблицу.

4. Последовательно меняя фильтры, снять показания и заполнить таблицу. Смену фильтров осуществлять только по часовой стрелке. В положении 8 блока фильтров вместо узкополосного фильтра устанавливается нейтральный ослабитель, что позволяет измерить величину  $U$ , пропорциональную энергетической светимости  $R_T$  в интервале длин волн от 2 до 20 мкм.

5. Повторить измерения по пункту 4 для температуры  $T_2$ . Для чего необходимо нажать на кнопку T2 и **выждать 5 минут** до начала проведения измерений.

6. Повторить измерения по пункту 4 для температуры  $T_3$ . Для чего необходимо нажать на кнопку ДИАПАЗОН и кнопку T3, **выждать 5 минут** и провести

измерения. Показания индикатора необходимо занести в таблицу. Эти показания занижены в 3 раза.

7. Нажатием кнопки МОДУЛЯТОР отключить двигатель от блока питания. Выключить установку нажатием кнопки СЕТЬ.

8. Все значения показаний, занесенные в таблицу для температуры  $T_3$ , умножить на 3 и занести в таблицу.

9. Построить графики зависимости  $U_{R,\lambda,T}$  от  $\lambda$  для трех температур, выбрав масштаб по оси длин волн  $1 \text{ мкм} = 1 \text{ см}$  (ось  $OX$ ), а по оси напряжений  $1 \text{ В} = 5 \text{ см}$  (ось  $OY$ ).

## Задание 2

### Проверка справедливости закона смещения Вина

1. Определить из графика  $U_{R,\lambda,T}$  величины  $\lambda_{\max}$  для трех температур.
2. Вычислить, используя формулу первого закона Вина, значения трех температур:

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}}, \quad b = 2897,8 \text{ мкм} \cdot \text{К}$$

3. Сравнить полученные результаты с величинами температур излучателя во время проведения эксперимента  $T_1 = 630 \text{ К}$ ,  $T_2 = 740 \text{ К}$ ,  $T_3 = 900 \text{ К}$ . Вычислить отклонения расчетных температур от заданных. Сделать выводы.

## Задание 3

### Проверка закона Стефана-Больцмана

Энергетическая светимость серого тела

$$R_T = \alpha_T \sigma T^4,$$

где  $\alpha_T$  – поглощательная способность серого тела;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;

$T$  – абсолютная температура.

$$\frac{R_{T_2}}{R_{T_1}} = \frac{\alpha_T \sigma T_2^4}{\alpha_T \sigma T_1^4} = \frac{T_2^4}{T_1^4}.$$

Рассчитайте  $\frac{R_{T_2}}{R_{T_1}}$ ,  $\frac{R_{T_3}}{R_{T_1}}$ ,  $\frac{R_{T_3}}{R_{T_2}}$  для  $T_1 = 630$  К,  $T_2 = 740$  К,  $T_3 = 900$  К.

Вычислите полученные экспериментально (в таблице столбец 8) отношения

$$\frac{U_{T_2}}{U_{T_1}}, \frac{U_{T_3}}{U_{T_1}}, \frac{U_{T_3}}{U_{T_2}}.$$

Сравните теоретические расчеты с экспериментальными.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое излучение называется тепловым?
2. Почему тепловое излучение является равновесным?
3. Что называется энергетической светимостью?
4. Что называется излучательной способностью? В чем она измеряется?
5. Что называется поглощательной способностью? В чем она измеряется?
6. Какое тело называется абсолютно черным?
7. Сформулируйте закон Кирхгофа. В чем его физический смысл?
8. Какое тело называется серым?
9. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана.
10. Изобразите вид графической зависимости  $r_{\lambda,T}$  от  $\lambda$  для АЧТ. Поясните вид этих графиков.
11. Сформулируйте законы Вина.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 5 т. Т. 4 / И.В. Савельев. – М.: Астрель, АСТ, 2003.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики. / Т.И. Трофимов. – М.: Высшая школа, 2003.
3. Детлаф, А.А. Курс физики. / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высшая школа, 2001 – 2002.
4. Зисман, Г.А. Курс общей физики / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. – М.: Наука, 1974.