

**Лабораторная работа № 2а (54)**

**Тепловое излучение. Определение постоянной Больцмана.**

Лабораторная работа разработана следующими преподавателями кафедры физики МГУЛ:

- аспирант Усатов И.И.,

доц. Царьгородцев Ю.П.

проф. Полуэктов Н.П.

## Задание

№	Напряжения источника, В									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0										
1	3,1	4,1	5,1	6,1	7,1	8,1	9,1	10,1	11,1	12,1
2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2	12,2
3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3	8,3	9,3	10,3	11,3	12,3
4	3,4	4,4	5,4	6,4	7,4	8,4	9,4	10,4	11,4	12,4
5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5
6	3,6	4,6	5,6	6,6	7,6	8,6	9,6	10,6	11,6	12,6
7	3,7	4,7	5,7	6,7	7,7	8,7	9,7	10,7	11,7	12,7
8	3,8	4,8	5,8	6,8	7,8	8,8	9,8	10,8	11,8	12,8
9	3,9	4,9	5,9	6,9	7,9	8,9	9,9	10,9	11,9	12,9

Цель работы – изучение теплового излучения и ознакомление с методами оптической пирометрии на примере определения температурной зависимости коэффициента поглощения нечерного тела. Определение постоянной Стефана-Больцмана.

## Введение

Электромагнитное излучение, причиной которого является возбуждение атомов и молекул вещества вследствие его нагревания, называется тепловым или температурным излучением. Температурное излучение является универсальным свойством тел. Все тела, температура которых отлична от абсолютного нуля, непрерывно излучают лучистую энергию. Этот процесс сопровождается уменьшением внутренней энергии тела, вследствие чего тело остывает. Одновременно с излучением энергии происходит поглощение лучистой энергии, падающей на поверхность тела. Последний процесс приводит к увеличению внутренней энергии тела. Все окружающие нас тела находятся в лучистом теплообмене. Если один из процессов преобладает (излучение или поглощение), то температура тела изменяется. Если же оба процесса эквивалентны, то температура тела остается постоянной. Состояние системы называется равновесным, если распределение энергии между телами и излучением остается неизменным во времени. Равновесность является основным условием теплового излучения.

Количественной характеристикой теплового излучения служит **спектральной плотностью энергетической светимости (излучательной способностью тела)** - отношение энергии излучения в 1 секунду (мощность) с единицы площади поверхности тела  $dW_{\nu, \nu+d\nu}^{изл}$  в интервале частот от  $\lambda$  до  $\lambda+d\lambda$  к ширине этого интервала  $d\lambda$ :

$$r_{\lambda, T} = \frac{dW_{\lambda, \lambda+d\lambda}^{изл}}{d\lambda} \quad (1)$$

Единица спектральной плотности энергетической светимости ( $r_{\lambda, T}$ ) — **ватт на метр в кубе** ( $\text{Дж}/\text{м}^3$ ).

Зная спектральную плотность энергетической светимости, можно вычислить **интегральную энергетическую светимость (интегральную излучательность)** (ее называют просто энергетической светимостью тела), просуммировав по всем частотам:

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

Энергетической светимостью  $R_T$  тела называется энергия, излучаемая с единицы площади поверхности излучающего тела в единицу времени во всем диапазоне частот.

Поглощательной способностью тела или коэффициентом поглощения  $\alpha_{\lambda, T}$  называется отношение энергии, поглощаемой единицей площади поверхности тела в единицу времени в интервале частот от  $\lambda$  до  $\lambda+d\lambda$ , к энергии, падающей на эту площадку в единицу времени в том же частотном интервале:

$$\alpha_{\lambda, T} = \frac{dW_{\lambda, T}^{полн}}{dW_{\lambda, T}^{падающ}} \quad (3)$$

$\alpha_{\lambda, T}$  и  $r_{\lambda, T}$  зависят от температуры и от длины волны излучения.

Тела, для которых  $\alpha_{\lambda, T} = 1$ , называются абсолютно черными. Излучательную способность абсолютно черного тела обозначим  $r_{\lambda, T}^*$ . 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. Спектр излучения абсолютно чёрного тела определяется только его температурой.

Наиболее чёрные реальные вещества, например, сажа, поглощают до 99 % падающего излучения (то есть имеют альбедо, равное 0,01) в видимом диапазоне длин волн, однако инфракрасное излучение поглощается ими значительно хуже. Среди тел Солнечной системы свойствами абсолютно чёрного тела в наибольшей степени обладает Солнце.

Термин был введён Густавом Кирхгофом в 1862 году.

Абсолютно чёрных тел в природе не существует, поэтому в физике для экспериментов используется модель. Она представляет собой замкнутую полость с небольшим отверстием. Свет, попадающий внутрь сквозь это отверстие, после многократных отражений будет полностью поглощён, и отверстие снаружи будет выглядеть совершенно чёрным. Но при нагревании этой полости у неё появится собственное видимое излучение. Поскольку излучение, испущенное внутренними стенками полости, прежде, чем выйдет (ведь отверстие очень мало), в подавляющей доле случаев претерпит огромное количество новых поглощений и излучений, то можно с уверенностью сказать, что излучение внутри полости находится в термодинамическом равновесии со стенками. (На самом деле, отверстие для этой модели вообще не важно, оно нужно только чтобы подчеркнуть принципиальную наблюдаемость излучения, находящегося внутри; отверстие можно, например, совсем закрыть, и быстро приоткрыть только тогда, когда равновесие уже установилось и проводится измерение).



Рис.1. Модель абсолютно чёрного тела

Все реальные тела в зависимости от их излучательной и поглощательной способности можно разбить на две группы: селективные и серые. Селективными называются такие тела, у которых излучательная и поглощательная способность заметно изменяется с изменением длины волны излучения. Вообще говоря, излучение всех тел, существующих в природе, в той или иной степени является селективным. Степень селективности определяется отличием спектрального распределения излучательной способности тела от этого же распределения для абсолютно черного тела.

**Излучательная способность серого тела**  $r_{\lambda,T}$  подобна кривой для абсолютно черного тела. Основная особенность серых тел – независимость их коэффициента поглощения от частоты, т.е. коэффициент поглощения серого тела зависит только от температуры  $\alpha_{\lambda,T} = \alpha_T$ . Излучательную и поглощательную способность серых тел связывает с излучательной способностью абсолютно черного тела **закон Кирхгофа**:

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T}^* \quad (4)$$

К концу XIX века излучение абсолютно черного тела было хорошо изучено экспериментально. В 1879 году Йозеф Стефан на основе анализа экспериментальных данных пришел к заключению, что интегральная светимость  $R^*(T)$  абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры  $T$ :

$$R^*(T) = \sigma T^4 \quad (5)$$

Несколько позднее, в 1884 году, Л. Больцман вывел эту зависимость теоретически, исходя из термодинамических соображений. Этот закон получил название **закона Стефана–**

**Больцмана.** Числовое значение постоянной  $\sigma$ , по современным измерениям, составляет  $\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

К концу 90-х годов XIX века были выполнены тщательные экспериментальные измерения спектрального распределения излучения абсолютно черного тела, которые показали, что при каждом значении температуры  $T$  зависимость  $r_{\lambda,T}^*$  имеет ярко выраженный максимум (рис.2). С увеличением температуры максимум смещается в область коротких длин волн, причем произведение температуры  $T$  на длину волны  $\lambda_m$ ,

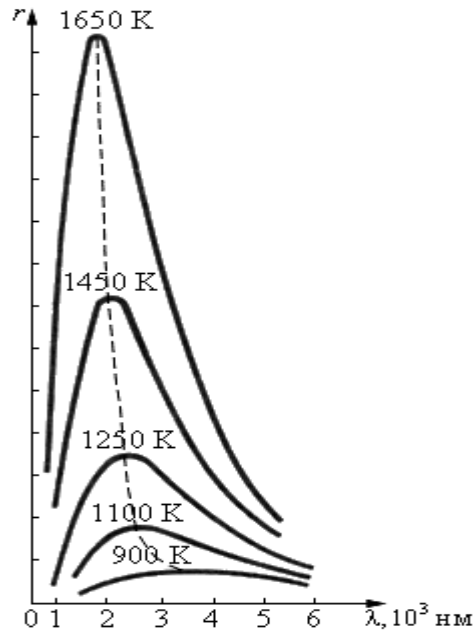


Рис. 2. Спектральное распределение  $r(\lambda, T)$  излучения черного тела при различных температурах

соответствующую максимуму, остается постоянным:

$$\lambda_m T = b \text{ или } \lambda_m = b/T \quad (6)$$

Это соотношение ранее было получено Вином из термодинамики. Оно выражает так называемый **закон смещения Вина**: длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре  $T$ . Значение постоянной Вина  $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ .

При практически достижимых в лабораторных условиях температурах максимум излучательной способности  $r_{\lambda,T}^*$  лежит в инфракрасной области. Только при  $T \geq 5 \cdot 10^3 \text{ К}$  максимум попадает в видимую область спектра. Максимум энергии излучения Солнца приходится примерно на 470 нм (зеленая область спектра), что соответствует температуре наружных слоев Солнца около 6200 К (если рассматривать Солнце как абсолютно черное тело).

Успехи термодинамики, позволившие вывести законы Стефана–Больцмана и Вина теоретически, вселяли надежду, что, исходя из термодинамических соображений, удастся получить всю кривую спектрального распределения излучения черного тела  $r_{\lambda,T}^*$ . В 1900 году эту проблему пытался решить знаменитый английский физик Д. Релей, который в основу своих рассуждений положил теорему классической статистической механики о равномерном распределении энергии по степеням свободы в состоянии термодинамического равновесия. Эта теорема была применена Релеем к равновесному излучению в полости. Несколько позже эту идею подробно развил Джинс. Таким путем удалось получить

зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны  $\lambda$  и температуры  $T$  :

$$r_{\lambda,T}^* = 8\pi kT \lambda^{-4} \quad (7)$$

Это соотношение называют **формулой Релея–Джинса**. Оно согласуется с экспериментальными данными только в области достаточно длинных волн (рис. 3.). Кроме того, из нее следует абсурдный вывод о том, что интегральная светимость  $R^*(T)$  черного тела должна обращаться в бесконечность, а, следовательно, равновесие между нагретым телом и излучением в замкнутой полости может установиться только при абсолютном нуле температуры.

Таким образом, безупречный с точки зрения классической физики вывод приводит к формуле, которая находится в резком противоречии с опытом. Стало ясно, что решить задачу о спектральном распределении излучения абсолютно черного тела в рамках существующих теорий невозможно. Эта задача была успешно решена М. Планком на основе новой идеи, чуждой классической физике.

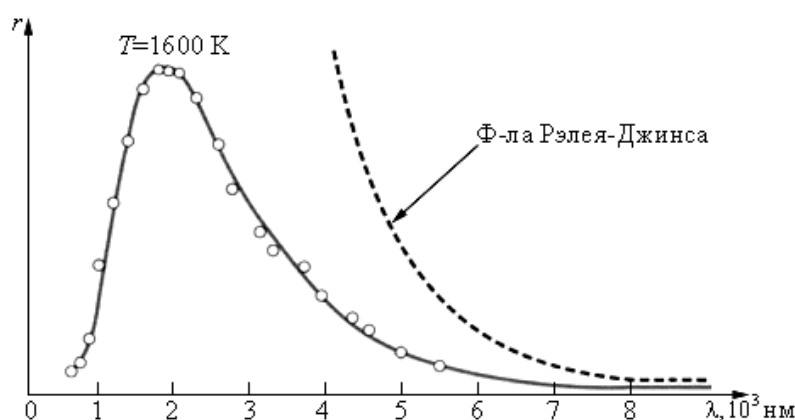


Рис.3. Сравнение закона распределения энергии по длинам волн  $r(\lambda, T)$  в излучении абсолютно черного тела с формулой Релея–Джинса при  $T = 1600$  К

**Планк пришел к выводу, что процессы излучения и поглощения электромагнитной энергии нагретым телом происходят не непрерывно, как это принимала классическая физика, а конечными порциями – квантами.** Квант – это минимальная порция энергии, излучаемой или поглощаемой телом. По **теории Планка**, энергия кванта  $E$  прямо пропорциональна частоте света:

$$E = h\nu, \quad (8)$$

где  $h$  – так называемая **постоянная Планка**.

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \quad (9)$$

Постоянная Планка – это универсальная константа, которая в квантовой физике играет ту же роль, что и скорость света в СТО.

На основе гипотезы о прерывистом характере процессов излучения и поглощения телами электромагнитного излучения Планк получил формулу для **спектральной плотности энергетической светимости** абсолютно черного тела. **Формулу Планка** удобно записывать в форме, выражающей распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела по частотам  $\nu$ , а не по длинам волн  $\lambda$ .

$$r_{\nu,T}^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \quad (10)$$

Здесь  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света,  $h$  – постоянная Планка,  $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град. – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

Формула Планка хорошо описывает спектральное распределение излучения черного тела при любых частотах. Она прекрасно согласуется с экспериментальными данными. Из

формулы Планка можно вывести законы Стефана–Больцмана и Вина. При  $h\nu \ll kT$  формула Планка переходит в формулу Релея–Джинса.

Решение проблемы излучения черного тела ознаменовало начало новой эры в физике. Нелегко было примириться с отказом от классических представлений, и сам Планк, совершив великое открытие, в течение нескольких лет безуспешно пытался понять квантование энергии с позиции классической физики.

#### Описание методики измерения

В данной работе в качестве источника теплового излучения используется ленточная вольфрамовая лампа СИ-8 с площадью  $S = 39.5 \text{ мм}^2 = 3.95 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ . В первом приближении будем считать вольфрам идеальным серым телом.

Нагревание вольфрамовой ленты в лампе производится электрическим током от источника постоянного тока Б5-21. Полагая, что электрическая мощность, которую потребляет спираль лампы, расходуется не только на лучеиспускание, но часть ее отводится в виде тепла, вследствие теплопроводности, конвекции в окружающую среду, мощность, расходуемую на излучение можно вычислить как  $P = kIU$ , (где  $k = 0.8$  коэффициент, учитывающий потери мощности и определяется опытным путем). Приравнявая эту мощность, мощности теряемой ежесекундно вольфрамовой спиралью лампы, площадью поверхности  $s$ , получим:

$$P = kIU = K\sigma S(T^4 - T_0^4) \quad (11)$$

где  $K$  – коэффициент черноты ( $K < 1$ ), зависящий от материала излучающей поверхности. Коэффициент черноты  $K$  для вольфрама в области температур от 900 до 2000 °С равен  $0,43 \pm 0,005$  для  $\lambda = 650 \text{ нм}$  - средней длины волны спектрального участка, пропускаемого при введении красного светофильтра пирометра. Из этого уравнения можно определить постоянную Стефана-Больцмана.

Температура вольфрамовой ленты измеряется пирометром, который измеряет **яркостную температуру**. **Яркостная температура**  $T_{я}$  — это температура черного тела, при которой для определенной длины волны его спектральная плотность энергетической светимости равна спектральной плотности энергетической светимости исследуемого тела, т. е.

$$r_{\lambda, T_{я}} = r_{\lambda, T}^* \quad (12)$$

где  $T$  - истинная температура тела. Из закона Кирхгофа (7) следует, что

$$\alpha_T = r_{\lambda, T_{я}} / r_{\lambda, T}^* \quad (13)$$

Так как для нечерных тел  $r_{\lambda, T_{я}} < r_{\lambda, T}^*$ , то  $T_{я} < T$ , т. е. истинная температура тела всегда выше яркостной. График, устанавливающий связь между  $T_{ярк}$  и  $T_{истин}$  приведен на рис.4. С достаточной степенью точности можно записать:

$$T_{истин} = 1.18 T_{ярк}. \quad (14)$$

В качестве яркостного пирометра обычно используется пирометр с **исчезающей нитью**. Накал нити пирометра подбирается таким, чтобы выполнялось условие (13).

Принципиальная схема оптического пирометра приведена на рис.5а.

Оптическая система пирометра представляет собой телескоп с объективом (1) и окуляром (4). Перед окуляром помещен красный светофильтр (3). Спектральная характеристика пропускания светофильтра подбирается с учетом спектральной чувствительности глаза так, чтобы при рассматривании объекта через светофильтр наибольшая видимая яркость соответствовала бы длине волны около 0,65 мкм. В фокусе объектива находится вольфрамовая нить пирометрической лампочки (5). Нить лампочки питается от аккумулятора; ее накал можно регулировать вручную реостатом (6). В поле зрения телескопа наблюдатель видит участок излучающей поверхности накаливаемого тела (объекта измерения) и на этом фоне – нить лампочки (рис.5б). Если яркости нити и накаливаемого тела неодинаковы, нить будет видна более темной или более светлой, чем фон.

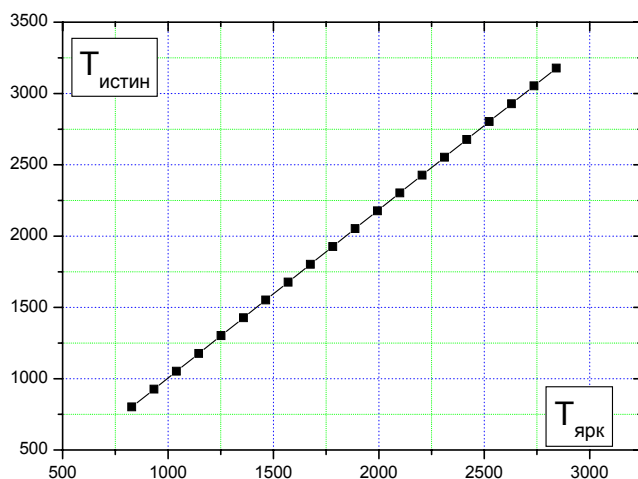


Рис.4. Связь между истинной и яркостной температур.

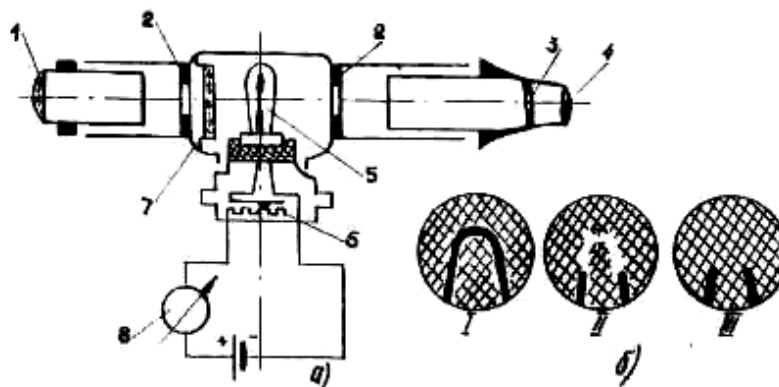


Рис.5. Схема пирометра.

Регулируя накал нити реостатом, наблюдатель добивается равенства яркостей, при этом изображение нити сольется с фоном и станет неразличимо (нить "исчезнет"). В этот момент яркостная температура нити равна яркостной температуре объекта измерения. Глаз весьма чувствителен к различению яркостей и момент "исчезновения" нити улавливается с достаточной уверенностью. Показывающий прибор (8), включенный в цепь нити накаливания, градуируется по образцовому пирометру или по температурным лампам, в °С яркостной температуры.

#### Порядок выполнения работы

1. Запустите программу Лабораторные\_работы.exe.
2. Ознакомьтесь с теорией лабораторной работы № 2, нажав кнопку описание. После ознакомления нажмите зелёную кнопку справа внизу.
3. Запустите тест и ответьте на вопросы, после чего нажмите кнопку «Проверить тест». Вы допускаетесь к выполнению работы, если все ответы на вопросы верны, при этом кнопка Лабораторная работа № 2 станет зелёной. В случае неправильных ответов можно попробовать пройти тест заново.
4. Запустите Лабораторную работу № 2
5. Включить тумблер «сеть» (7) на блоке питания.
6. Установить напряжение на лампе 3 В (при помощи ручки регулятора (4) или введите необходимое значение в контроллер под ручкой (4)).
7. Вращая кольцо реостата пирометра (2), добейтесь исчезновения нити пирометра на фоне



исследуемой лампы (рис.5, б).

8. Запишите в таблицу полученные значения яркостной температуры в градусах Цельсия, а также вольтметра (6) и амперметра (5), нажав для этого кнопку «Add» (добавить)

9. Повторяйте пункты 7-9, каждый раз увеличивая напряжение на 1 В пока не достигнете 13 В включительно.

10. Переведите полученную яркостную температуру из градусов Цельсия в градусы Кельвина по формуле:  $T_{ярк}(K) = t_{ярк}^0(C) + 273$  и занесите в соответствующий столбец таблицы.

11. Зная яркостную температуру нити  $T_{ярк}$  исследуемой лампы, определите ее истинную температуру  $T_{ист.} = 1.18 T_{ярк}$  и занесите в таблицу.

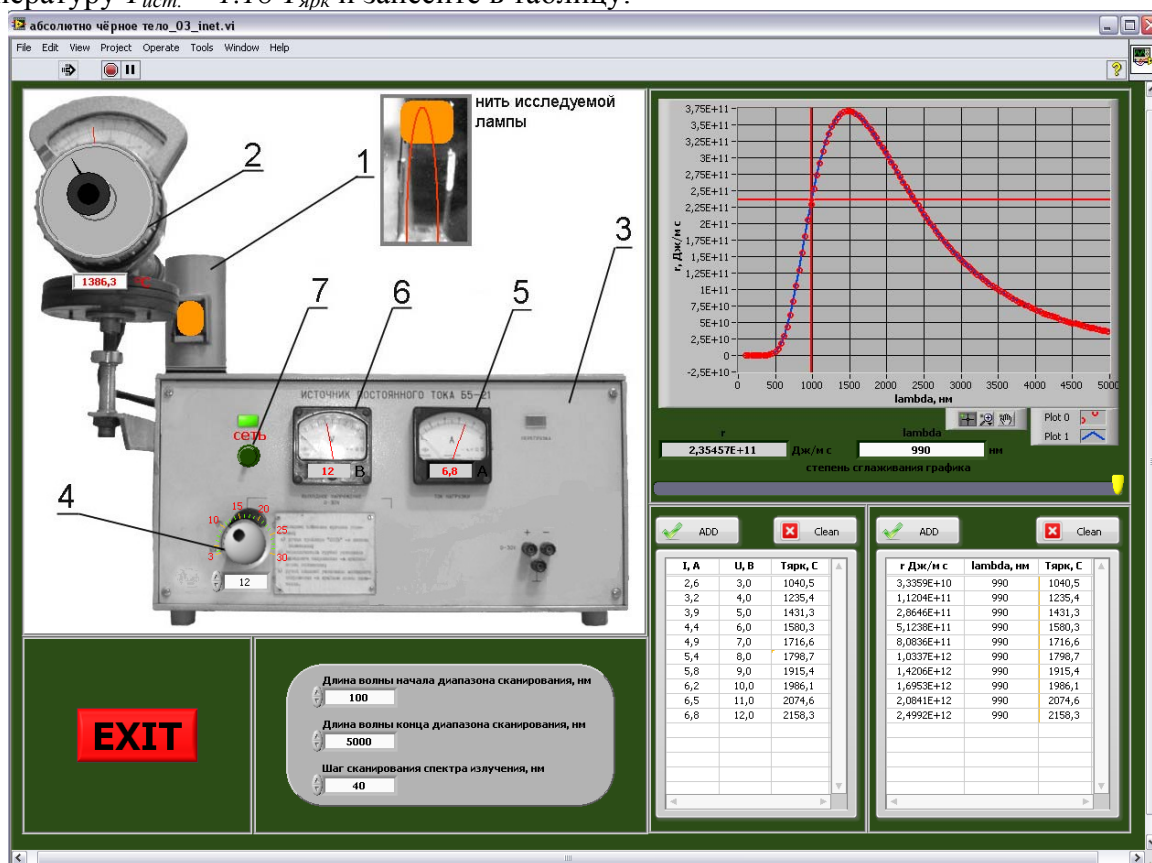


Рис.6. Схема установки

12. Возведите  $T_{ист}$  в четвертую степень и занесите в таблицу в следующем виде:

Пример:  $T^4 = 1648,4^4 = 7384373475986$ ,  $68 = 7,384 \cdot 10^{12} = 7,38E12$  (округляйте до 2-го знака после запятой).

N	$t_{ярк}^0, ^\circ C$	$T_{ярк} K$	$T_{ист.} K$	$T_{ист.}^4, K^4$	I, A	U, B	W=I·U Вт
1	1124	1397	1648,46	7,384E12	2,6	3	7,8
2							
...	...	...	...	...	...	....	....
8							
9							
10							

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

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

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

Ясно, что  $T_0^4 \ll T^4$ , и поэтому температурой окружающей среды можно пренебречь. Учитывая все вышесказанное, формулу (14) можно представить в виде:

$$kIU = K\sigma ST^4 = 0.43\sigma ST^4, \quad (15)$$

где  $S = 3.95 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  – площадь излучающей ленты лампы. Принимаем, что на излучение лампы идет 80% от подводимой электрической мощности, т.е.  $k = 0.8$  и площадь нити. Тогда из (15) имеем:

$$IU = 2.123 \cdot 10^{-5} \sigma T^4 \quad (16)$$

Сделаем переобозначения:  $Y = I \cdot U$ ,  $X = T^4$ . Получим:

$$Y = kX \quad (17)$$

где 
$$k = 2.123 \cdot 10^{-5} \sigma = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (18)$$

тангенс угла наклона этой прямой.

Из полученного значения  $k$  находим среднее значение

$$\langle \sigma \rangle = \frac{k \cdot 10^5}{2.123} \quad (19)$$

Далее построение графика и определение величины и погрешности постоянной Больцмана проведем с помощью программы Excel.

1. Запустите программу Excel.

2. Наведите курсор на ячейку A1 (столбец A, строка 1) и нажмите левой клавишей мышки. Ячейка выделится жирной рамкой. В ячейку A1 запишите  $X = T^4$ , в B1 –  $Y = IU$ , в C1 –  $X * X$ , в D1 –  $Y * Y$  и в ячейку E –  $X * Y$ .

3. Занесите данные ваших измерений лабораторной работы  $X_i (T_{ист}^4)$  и  $Y_i (IU)$ , в столбцы A и B, начиная со 2-й строки. Для этого выделите 2-ю строку и нажмите правую кнопку мышки. В появившемся окне выберите пункт «формат ячейки», нажмите ее и в новом окне выберите «числовой» формат с 2-мя десятичными знаками после запятой. Если число очень большое или очень маленькое, то выбирайте «экспоненциальный» формат. Например: 1230000000 запишется как 1,23E9. Затем вводите данные измерений в последующие строки.

4. Выделите ячейку C2 и запишите в нее  $=A2*A2$  (использовать латинскую клавиатуру) и нажмите «ОК». В этой ячейке появится квадрат числа в ячейке A2. Выделите эту ячейку. На рамке, выделяющей активную ячейку, справа внизу имеется жирный квадратик. Протягивание рамки этой ячейки за этот квадратик вниз позволяет распространить записанные в активной ячейке действия на необходимое количество ячеек. Таким образом, в столбце C будут расположены квадраты столбца A.

5. Подобные действия произведите с ячейкой D2 =  $B2*B2$  и далее со столбцом D, где будут находиться квадраты Y и ячейкой E2 =  $A2*B2$  и столбцом E, где будут расположены  $X*Y$ .

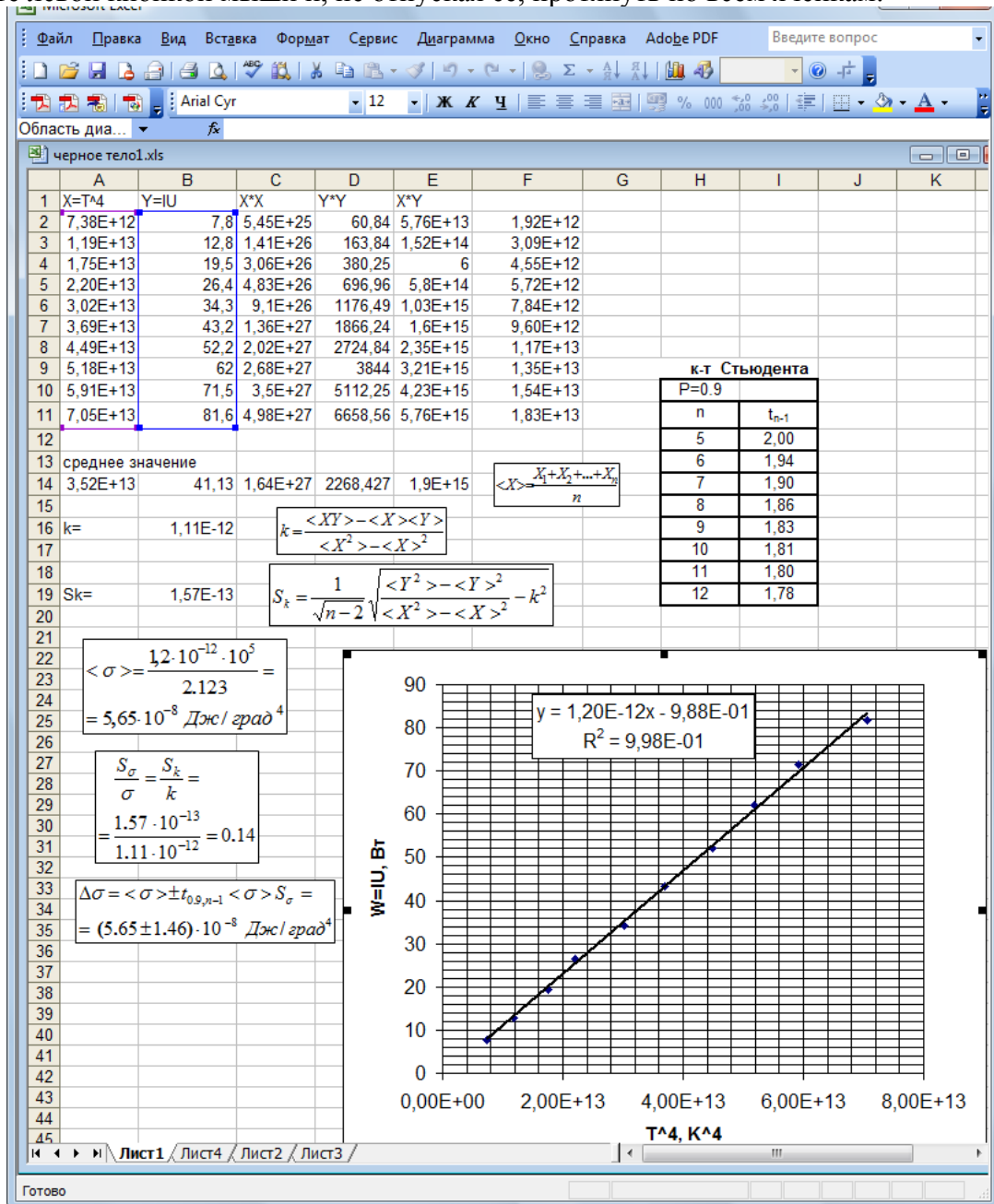
6. Определение среднего значения искомой величины в лабораторной работе и ее погрешностей измерений будем производить **графическим методом**. В этом методе полученные данные аппроксимируются линейной функцией  $Y = kX + a$ . Здесь  $k$  – тангенс угла наклона прямой, из которого будем определять среднее значение искомой величины, а погрешность искомой величины из среднеквадратичного отклонения величины  $k$  –  $S_k$ . Они выражаются следующими формулами:

$$k = \frac{\langle XY \rangle - \langle X \rangle \langle Y \rangle}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} \quad (20)$$

$$S_k = \frac{1}{\sqrt{n-2}} \sqrt{\frac{\langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} - k^2}, \quad (21)$$

где  $n$  – число измерений.

7. Выделите столбцы с данными  $X$  и  $Y$ . Для этого навести курсор на середину ячейки, нажмите левой кнопкой мыши и, не отпуская ее, протянуть по всем ячейкам.



8. Над таблицей расположено несколько панелей инструментов. На одной из них расположена кнопка «Вставка». Нажмите кнопку «Вставка» и в раскрывающемся меню выберите «диаграмма».

9. Откроется окно «мастер диаграмм (шаг 1 из 4)». В окне «Тип» выбираем тип «точечная». На соседнем поле нажмите самый верхний рисунок и затем кнопку «далее».

10. Откроется окно «мастер диаграмм (шаг 2 из 4)». Появится график, состоящий из точек. Нажмите кнопку «далее». 11. Откроется окно «мастер диаграмм (шаг 3 из 4)». В окне «Заголовки» в рамках «Ось X» и «Ось Y» внести необходимые записи. В окне «Линии сетки» поставить галочки в каждую клетку. Нажмите кнопку «далее».

12. На полученном графике наведите курсор на любую точку и нажмите правой клавишей мышки. В раскрывшемся окне нажмите «Добавить линию тренда».

13. В окне «Тип» выбрать «Линейная». На верхней панели нажать «Параметры».

14. В раскрывшемся окне «Параметры» поставить галочки в квадратиках «показывать уравнение на диаграмме» и « поместить на диаграмму величину достоверности аппроксимации  $R^2$ ». Нажать «ОК».

15. На графике появится формула  $Y=kX+A$ . Постоянная Больцмана (ее среднее значение) вычисляется из коэффициента  $k$  согласно формуле (18). Далее находим погрешность измерений, а именно среднеквадратичную ошибку по формуле (21).

16. Для этого выделите ячейку A14, затем в верхней панели инструментов нажмите «Вставка» и подпункт«Функция». В появившемся окне «Мастер функций» можно увидеть все встроенные в MS Excel функции. Они расположены по категориям (см. поле «Категория»). Выбираем категорию «Статистические», а в ней функцию СРЗНАЧ и нажимаем «ОК». Справа от этого поля расположен элемент управления в виде цветного квадрата. Этот элемент позволяет непосредственно в таблице указать ячейки, к которым нужно применять данную функцию. После нажатия на этот элемент (цветной квадрат) окно «Аргументы функции» сворачивается до размеров поля «Число1», а данные в электронной таблице становятся хорошо видны. С помощью мыши охватите ячейки, по данным которых нужно вычислить среднее значение. Номера выбранных ячеек автоматически отобразятся в поле «Число1». Если выбраны ячейки A2, A3, ... A10, то в поле будет записано A2:A10. После этого вновь нажмите на управляющий элемент в виде цветного квадрата, чтобы восстановить прежний вид окна «Аргументы функции», и нажмите кнопку «ОК» для завершения операции. В результате в ячейке A14 появится посчитанное среднее значение данных  $X$  –

$$\langle X \rangle = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (22)$$

Выделим ячейку A14 . На рамке, выделяющей активную ячейку, справа внизу имеется жирный квадратик. Протягивание рамки этой ячейки за этот квадратик вправо позволяет распространить записанные в активной ячейке действия на необходимое количество ячеек. Протянем рамку вправо до E14 включительно, в них появятся числа, которые являются средними значениями величин каждого столбца.

17. Выделим ячейку A16, запишем в нее  $k =$ , а в ячейку B16 запишем: =(E14-B14\*A14)/(C14-A14\*A14). Мы определили тангенс угла наклона прямой аналитическим методом согласно уравнению (23). В ней появится число, совпадающее по значению с коэффициентом при  $X$  в формуле на графике.

18. Выделим ячейку A18, запишем в нее  $S_k =$ , а в ячейку B18 запишем: =КОРЕНЬ((D14-B14\*B14)/(C14-A14\*A14)-B16\*B16)/КОРЕНЬ(n-2), где  $n$  – количество измерений. Мы определили среднеквадратичную ошибку измерений тангенса угла наклона согласно формуле (24).

18. Так как количество измерений  $n$  мало, то погрешность коэффициента  $k$  нужно увеличить на коэффициент Стьюдента  $t_{P,n-1}$  :

$$\Delta k = t_{P,n-1} S_k \quad (23)$$

Таблица коэффициентов Стьюдента.

Кол-во измерений n	Вероятность P = 0.9	Вероятность P =0.95
2	6,31	12,7
3	2,92	4,3
4	2,35	3,18
5	2,13	2,78
6	2,02	2,57
7	1,94	2,45
8	1,89	2,36
9	1,86	2,31
10	1,83	2,26
11	1,8	2,21

Здесь  $P$  - вероятность попадания величин измерений в диапазон  $\Delta k$ , т.е.  $P=0.9$  означает, в 9 случаях из 10, или 90 из 100 величины измерений  $k$  будут находиться в диапазоне от  $k-\Delta k$  до  $k+\Delta k$ . Погрешность измерений величины  $\sigma$  можно найти из формулы (19):

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma}{k} \Delta k \quad (24)$$

Окончательно, искомая величина записывается в виде:

$$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm t_{p=0.9, n-1} \frac{S_k}{k} \langle \sigma \rangle \quad (25)$$

### Вопросы теста

Какая характеристика теплового излучения имеет размерность  $\text{Вт}/\text{м}^2$

1. интегральная энергетическая светимость  $R$ ;
2. спектральная плотность энергетической светимости  $r_{\lambda, T}$ ;
3. спектральная плотность энергетической светимости  $r_{\nu, T}$ ;
4. спектральная поглощательная способность  $\alpha_{\nu, T}$ .

Какой спектр характерен для излучения нагретого твёрдого тела?

1. сплошной;
2. линейчатый;
3. полосатый.

Два тела, изготовленные из стекла и металла, нагреты до одной температуры

$\left(\frac{r_{\lambda, T}}{\alpha_{\lambda, T}}\right)$  стекло ?  $\left(\frac{r_{\lambda, T}}{\alpha_{\lambda, T}}\right)$  металл. Какой знак можно поставить перед этим выражением?

1. >;
2. <;
3. =
4. ничего нельзя сказать, так как нужны дополнительные сведения о физических состояниях этих тел.

Какой из тепловых законов отражает зависимость  $\max$  спектральной плотности излучения от длины волны?

1. Кирхгофа;
2. Вина;
3. Стефана-Больцмана;
4. Рэлея-Джинса;
5. Планка.

Укажите соотношения, связывающие спектральные плотности энергетической светимости  $r_{\lambda, T}$  и  $r_{\nu, T}$ .

1.  $r_{\lambda, T} = r_{\nu, T}$ ;
2.  $r_{\lambda, T} > r_{\nu, T}$ ;
3.  $r_{\lambda, T} < r_{\nu, T}$ ;
4.  $r_{\lambda, T} = \frac{c}{\lambda^2} \cdot r_{\nu, T}$ ;
5.  $r_{\nu, T} = \frac{c}{\lambda^2} \cdot r_{\lambda, T}$ .

Какими законами определяется положение максимума кривой на графике «спектральная плотность энергетической светимости – длина волны»?

1. Стефана-Больцмана;
2. Рэлея-Джинса;
3. Кирхгофа;
4. Вина;
5. Планка.

Какое из тел одинаковых размеров и нагретых до одной и той же температуры больше излучает энергии?

1. белое;
2. чёрное;
3. серое;
4. красное;
5. синее.

Какой цвет имеет абсолютно чёрное тело?

1. цвет абсолютно чёрного тела зависит от температуры;
2. чёрный цвет;
3. белый цвет;
4. не имеет цвета;
5. нельзя дать определённый ответ.

Как изменится энергетическая светимость абсолютно чёрного тела, если при его нагревании длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности, изменилась в 2 раза?

1. уменьшится в 4 раза;
2. увеличится в 4 раза;
3. увеличится в 16 раз;
4. уменьшится в 16 раз.

Какая характеристика теплового излучения называется спектральной плотностью энергетической светимости?

1. энергия, излучаемая с единицы поверхности;
2. энергия, излучаемая за единицу времени с единицы поверхности;
3. поток энергии с единицы поверхности в единичном частотном диапазоне;
4. поток энергии во всех направлениях в единичном частотном диапазоне;
5. энергия, излучаемая за единицу времени с единицы поверхности в единичном диапазоне длин волн.