

Экспериментальная проверка закона Стефана-Больцмана

Цель работы: изучить зависимость энергетической светимости тела от его температуры.

Различные виды энергии могут переходить в энергию, излучаемую телом. *Тепловым* называется излучение, при котором тепловая энергия переходит в энергию излучения.

Тепловое излучение имеет место при любой температуре тела. При этом излучаемая мощность существенно зависит от температуры.

Энергетической светимостью R называется мощность, излучаемая единичной поверхностью тела по всем направлениям.

Единица измерения этой величины в системе СИ - Вт/м².

Для абсолютно черного связь энергетической светимости с абсолютной температурой T выражается законом Стефана-Больцмана:

$$R = \sigma \cdot T^4, \quad (1)$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт м⁻²К⁻⁴).

В данной экспериментальной установке тепловое излучение испускается нагретым до температуры T черным цилиндром, находящимся в печи 2 рис.1. Излучение регистрируется приемником 4, температура которого близка к комнатной (T_0). Внутри приемника расположена площадка, которая, поглощая падающее на нее излучение, нагревается.

В случае теплового равновесия, мощность, поступающая на площадку приемника от нагретого тела равна мощности, теряемой этой площадкой при теплообмене с окружающей средой.

Мощность излучения N_1 , поступающая от нагретого тела, пропорциональна его энергетической светимости:

$$N_1 = \alpha \cdot R(T). \quad (2)$$

Если температура площадки незначительно отличается от температуры окружающей среды, то мощность N_2 , отдаваемая площадкой внешней среде путем теплообмена (теплопередачи, конвекции и излучения), будет пропорциональна разности температур ΔT :

$$N_2 = \beta \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где $\Delta T = T_n - T_0$, а T_n и T_0 – температуры площадки и окружающей среды, соответственно.

При термодинамическом равновесии $N_1 = N_2$. Используя соотношения (2) и (3), запишем:

$$\alpha \cdot R(T) = \beta \cdot \Delta T. \quad (4)$$

Нагрев площадки приемника излучения фиксируется специальной термопарой, находящейся внутри него. Величина термоэдс U пропорциональна разности температур спаев термопары:

$$U = \gamma \cdot \Delta T. \quad (5)$$

Подставив соотношение (5) в (4) и объединив все постоянные, получим:

$$U = C \cdot T^4, \quad (6)$$

где C – постоянная величина.

Решаемые задачи:

- приобрести навыки измерений энергии теплового излучения;
- измерить зависимость мощности, излучаемой телом, от его температуры.

Оптические элементы и аппаратура (рис.1):

- ✓ датчик температуры (NiCr-Ni термопара) (1);
- ✓ печь (2);
- ✓ тепловой экран (3);
- ✓ приемник теплового излучения (4);
- ✓ блок сопряжения с PC SENSOR-CASSY 2 (5);
- ✓ оптическая скамья (9).

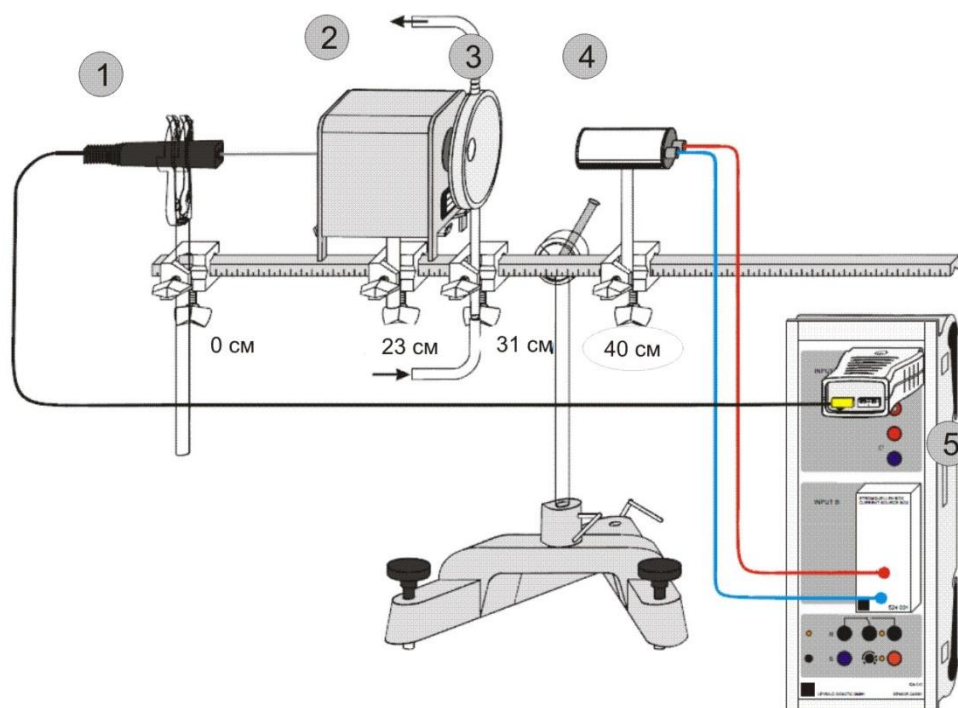


Рис.1. Внешний вид экспериментальной установки

Проверьте комплектность и правильность расположения элементов экспериментальной установки, внешний вид которой показан на рис.1 (расстояния отсчитываются по левым краям держателей).

Проверьте правильность подключения NiCr-Ni термопары 1 ко входу "Input A" и датчика теплового излучения 4 ко входу "Input B" блока сопряжения с PC «SENSOR-CASSY 2» (5 на рис.1).

На рис.2 показан общий вид печи 1, в которой нагревается полый цилиндр до температуры около 400⁰С.

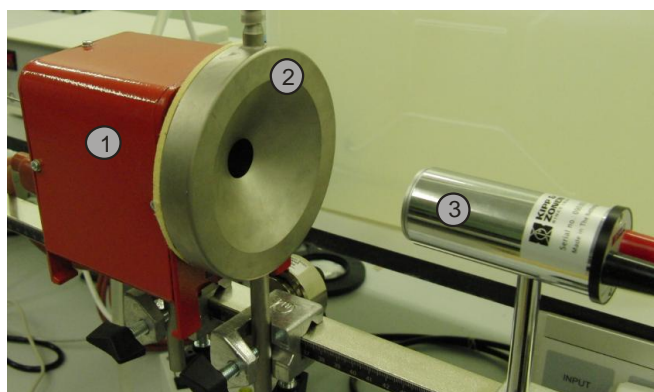


Рис.2 Общий вид печи (1), теплового экрана (2) и приемника излучения (3).

Излучение из цилиндра выходит через отверстие в тепловом экране 2 и попадает в окно приемника излучения 3. Температура теплового экрана поддерживается комнатной, благодаря тому, что через него прокачивается вода постоянной температуры. Поэтому приемник будет фиксировать возрастающий поток теплового излучения из отверстия на фоне постоянного излучения от экрана. Это излучение очень мало, сигнал от него не превышает $\pm 0,03$ мВ. Поэтому этой величиной можно пренебречь.

Откройте программу CASSY Lab 2.

В главном меню откройте окно “File”.

В подменю “Recent Files” откройте файл “D:\Тепловое излучение.labx”.

Закройте окно «CASSY» в центре экрана.

В левой части экрана расположены два окна.

В первом окне “Temperature” выводятся мгновенные значения с датчика температуры - термопары 1 (рис.1) – температура излучающего черного тела в градусах Цельсия (θ_{A11}). В качестве термопары используется сплав двух проводников: Ni и Ni-Cr. Один спай термопары вводится внутрь печи и касается нагреваемого черного цилиндра. Второй спай находится внутри ручки при постоянной температуре. Показания термопары также заносятся в таблицу, расположенную под всплывающими окнами. По умолчанию используются следующие установки датчика температуры:

Диапазон измерений (range) $0^{\circ} - 1200^{\circ}\text{C}$

Время усреднения – 1 с


Интервал времени между измерениями – 30 с.


Во втором окне представлены мгновенные значения U_{B1} с датчика излучения (4 на рис.1 и 3 на рис.2). Излучение, падающее на окно приемника, поглощается черной площадкой и вызывает её нагрев. К площадке припаян один конец термопары, а её второй конец находится при комнатной температуре. При повышении температуры площадки возникает эдс U_{B1} , которая фиксируется датчиком. Поскольку нагрев площадки пропорционален поглощенной мощности, то величина U_{B1} будет пропорциональна мощности падающего излучения. Эта величина (в мВ) выводится на дисплей и заносится в таблицу, расположенную под всплывающими окнами. По умолчанию используются следующие установки датчика излучения:


Диапазон измерений (range) $-30 - +30$ мВ

Время усреднения – 1 с

Интервал времени между измерениями – 30 с.

Если Вы хотите изменить настройки условий измерений, то нажмите кнопку  “Show setting”.

Начать измерения можно, нажав клавишу F9 или нажав кнопку . Повторное нажатие на эту кнопку останавливает процесс измерений.

Для изменения настроек поля графиков нажмите кнопку  “Show setting”. Перейдите по пути ”Display” - ”Standard”. Нажмите на имя той величины, для которой Вы хотите изменить настройки координатных осей (θ_{Al1} или U_{Bl}). По умолчанию обе величины строятся в зависимости от времени t .

Порядок выполнения работы:

Программа CASSY должна быть запущена, а на экране должны быть открыты окна “Temperature” и “Voltage”.

1. Включите водяной насос для прокачки воды через тепловой фильтр.
2. Подключите печку к клеммам 1 и 2 (рис.3) источника питания, а зеленый провод – к клемме 3 «Земля»). Включите печку выключателем 4.

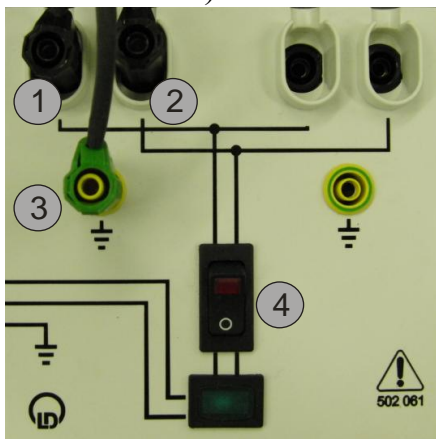


Рис.3. Внешний вид источника питания печки

3. Внимательно следите за повышением температуры в печке по показаниям термопары в окне “Temperature”. Доведите температуру печки до 400 – 500⁰С.

4. Аккуратно снимите защитное стеклянное окно с приемника излучения.

5. Выключите печку и спустя 3 минуты начните регистрацию, нажав клавишу F9. На поле графиков, с интервалом 30 секунд, должны появляться регистрируемые данные.

6. Когда температура печки достигнет 150⁰С, остановите процесс регистрации, нажав клавишу F9. Выключите водяной насос.

7. Представьте полученные результаты в виде графической зависимости U от T^4 .

Для этого нажмите кнопку  “Show setting”. В открывшемся справа окне “Settings” пройдите по цепочке “Calculator”-“Formula”-“New”.

В окне “Symbol” введите имя переменной, которая будет отложена по оси абсцисс. Поскольку мы должны отложить по этой оси величину T^4 , то в окне “Symbol” следует набрать T^4*10^{-9} . Такая комбинация отобразится на

оси в виде надписи $T^4 \cdot 10^{-9}$. В окне “Unit” введите единицу измерения этой величины (K^4).

Задайте диапазон изменений этой величины от 0 до 100.

Введите формулу, по которой будет рассчитываться эта переменная. Формула будет иметь вид: $(\&JA11+273,15)^4 \cdot 10^{-9}$.¹

В корневом каталоге установок ”Settings” пройдите по цепочке “Displays” – ”Standard” - T^4 . Выберите переменную T^4 для оси X и переменную U_{B1} – для оси Y .

Если требуется установить диапазон значений, откладываемых на осях, подведите курсор мыши к оси и щелкните правой клавишей мыши. Выберите опцию “Find Minimum and Maximum”

8. Аппроксимируйте полученную зависимость линейной функцией. Для этого активизируйте расположенное в верхней командной строке окно ”Diagram” и далее ”Fit Function” – “Best-fit Straight Line”.

Подведите курсор мыши к крайней левой точке графика, нажмите левую клавишу мыши и, удерживая её, переместите курсор до крайней правой точки. При этом у Вас выделятся голубым цветом те экспериментальные точки, через которые методом наименьших квадратов будет проведена прямая.²

9. Выведите на экран в поле Status Line параметры аппроксимации. Для этого нажмите на кнопку  ”Toggle Large Display of Status Line On/Off”.

10. Сохраните файл под своим оригинальным именем и подготовьте отчет о выполненном исследовании.

Вопросы к обсуждению с преподавателем.

1. Дайте определения основным физическим величинам и понятиям, характеризующим излучение: испускательная и поглощательная способность, энергетическая светимость, абсолютно черное тело.
2. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана, поясните его физический смысл.
3. Объясните назначение всех элементов экспериментальной установки.
4. Каким образом Вы проверяете выполнение закона Стефана - Больцмана.
5. Выведите рабочую формулу.
6. Объясните полученные результаты.

Рекомендуемая литература.

1. Ландсберг Г.С. Оптика, Изд.6, М., Физматлит, 2006. Глава XXXVI.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т.4. Оптика. Изд.3. М., Физматлит, 2005. Глава 10.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Книга 5. М., АСТ: Астрель, 2005. Глава 1.
4. Бутиков Е.И. Оптика. Изд.2, С-Пб., Невский диалект, 2003. §9.1, §9.2.
5. Годжаев Н.М. Оптика., М., Высшая школа, 1977. Глава 14.

¹ *Комментарий:* символ θ_{A11} , которым обозначается температура, содержит греческую букву. Этот символ, кодируется комбинацией &JA11. Множитель 10^{-9} является масштабирующим. Он позволяет откладывать на оси абсцисс величины, не превышающие 300.

² *Комментарий.* Если Вы хотите отменить аппроксимацию и график прямой, проследуйте по пути: ”Diagram” – ”Delete Last Evaluation”.