

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Факультет «Фундаментальные науки»
Кафедра «Физика»

А.В. Семиколенов, И.Н.Фетисов

Закон Стефана-Больцмана

*Методические указания к лабораторной работе К62
по курсу общей физики*

Москва

(С) 2014 МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

ВВЕДЕНИЕ

Тепловое излучение - электромагнитное излучение, испускаемое всеми телами при температуре выше абсолютного нуля и возникающее за счет их внутренней энергии [1 - 4]. Для твердых и жидких тел излучение имеет непрерывный спектр в широкой области длин волн. С повышением температуры мощность излучения сильно возрастает, а максимум спектра смещается к более коротким волнам.

Видимый глазом свет имеет длины волн от $\lambda = 0,4$ мкм для фиолетового излучения до $\lambda = 0,76$ мкм для красного света. Излучения с $\lambda = 0,76 \dots 1000$ мкм называют *инфракрасным* (ИК), а с $\lambda = 0,4 \dots 0,01$ мкм - *ультрафиолетовым* (УФ). Все эти волны образуют *оптический диапазон*.

Тела не только испускают собственное тепловое излучение, но и отражают падающее на них излучение других тел. Холодные тела мы видим только в отраженном свете, так как их собственное тепловое излучение лежит в инфракрасном диапазоне. Если тело нагреть до высокой температуры (выше 600 °С), его собственное излучение становится видимым.

Кроме теплового излучения, существует *люминесценция* - свечение вещества, вызванное внешними источниками энергии. Например, в люминесцентных лампах люминофор испускает видимый свет под воздействием ультрафиолетового излучения газового разряда. Второй пример: свечение люминесцентного экрана электронно-лучевой трубки осциллографа обусловлено потоком быстрых заряженных электронов. Люминесценция не связана с нагревом вещества, видимый свет люминофоры испускают в холодном состоянии.

Из всех видов излучений только тепловое излучение может находиться в *термодинамическом равновесии* с веществом. Поясним следующим примером. Пусть несколько тел, нагретых до различной температуры, окружены оболочкой с идеально отражающими стенками. Если даже внутри этой полости будет абсолютный вакуум, тела будут обмениваться энергией между собой через посредство излучения. Более теплые тела будут охлаждаться, так как они испускают большее количество энергии, чем получают от окружающих тел, а менее нагретые тела – нагреваться, потому что они получают больше энергии, чем отдают. Опыт показывает, что, в конце концов, обязательно устанавливается стационарное состояние, при котором все тела приобретают одинаковую температуру. В стационарном состоянии тела поглощают в единицу времени ровно столько же энергии, сколько отдают ее, а объемная плотность энергии излучения в пространстве между телами достигает некоторой определенной величины, соответствующей данной температуре. В стационарном состоянии излучение в полости называют *равновесным тепловым излучением*, его характеристики зависят от температуры тел и не зависят от вещества тел.

Характеристики теплового излучения тел зависят от их способности поглощать излучение. Тела, которые полностью поглощают падающее на них излучение других тел, называются абсолютно черными телами (АЧТ). Они испускают равновесное тепловое излучение, теория которого рассмотрена ниже. Излучение реальных тел, например, металлов с чистой поверхностью без окислов, может сильно отличаться от излучения АЧТ. Характеристики излучения различных тел важны для практики, например, в вопросах теплопередачи или дистанционного измерения температуры тел по их тепловому излучению.

Цель работы – ознакомиться с законами теплового излучения, изучить температурную зависимость потока теплового излучения вольфрамовой лампы накаливания.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Энергетические характеристики излучения

Энергетические характеристики излучения подразделяют на интегральные и спектральные. К интегральным характеристикам относятся:

энергия излучения W , Дж;

поток излучения (мощность) $\Phi = dW/dt$, Вт (dW - энергия излучения за время dt);

энергетическая светимость (излучательность)

$$M = \frac{dW}{dt dS},$$

где dW – энергия излучения за время dt с поверхности тела площади dS . Единица измерения излучательности - Вт/м².

Спектральные характеристики служат для описания распределения энергии излучения по длинам волн или частотам.

Спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) равна отношению

$$M_{\lambda} = \frac{d\Phi}{dS d\lambda},$$

где $d\Phi$ – поток излучения с площади dS в интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$. Испускательная способность есть мощность излучения с единицы площади в единичном интервале длин волн. Единица измерения энергетической светимости - Вт/м³. Например, если при некоторых значениях температуры и длины волны имеет $M_{\lambda}=10^9$ Вт/м³, то тело в узком интервале длин волн $d\lambda = 0,1$ мкм = 10^{-7} м с площади 10^{-4} м² испускает поток излучения $d\Phi = M_{\lambda} dS d\lambda = 10^{-2}$ Вт. В литературе иногда длину волны выражают в мкм, тогда единицей измерения испускательной способности служит Вт/(м²·мкм), например, $M_{\lambda} = 10^9$ Вт/м³ = 10^3 Вт / (м²·мкм).

Энергетическая светимость и спектральная плотности энергетической светимости связаны соотношением:

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda .$$

Поток излучения с площади S в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 равен

$$\Phi = \int_S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda} d\lambda dS .$$

2. Законы теплового излучения

Тепловое излучение тела зависит от его способности поглощать излучение. Пусть на тело падает поток Φ монохроматического излучения с длиной волны λ , из которого телом поглощается поток $\Phi_{\text{погл}}$, а остальное излучение отражается или проходит сквозь тело. *Спектральным коэффициентом поглощения (поглощательной способностью)* называется отношение поглощенного потока к падающему потоку:

$$\alpha = \Phi_{\text{погл}} / \Phi .$$

Коэффициент поглощения α – безразмерная величина, которая в принципе может изменяться от нуля до единицы. Коэффициент поглощения зависит от длины волны λ , температуры, вещества и состояния поверхности тела (шероховатость, окислы, ржавчина, грязь и т.д.).

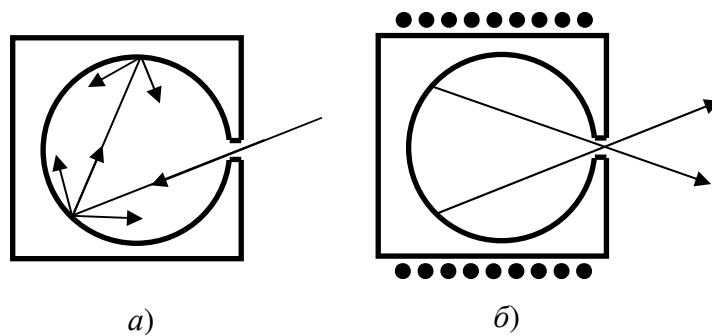


Рис. 1.

Модель абсолютно черного тела в случае поглощения (а) и испускания (б) излучения.

В теории теплового излучения важную роль играет понятие *абсолютно черного тела* (АЧТ), для которого $\alpha = 1$ для любых длин волн и температур. Строго говоря, в природе таких тел нет. Однако можно создать тела, для которых α близко к единице в некотором интервале длин волн и температур. На практике хорошей моделью АЧТ является маленькое отверстие в большой полости с темными рассеивающими стенками (рис. 1). Если излучение падает на отверстие снаружи (рис. 1, а), то оно практически полностью поглощается внутри полости в результате многократных отражений и поглощений. Если полость равномерно нагреть, то выходящее из отверстия излучение является равновесным тепловым излучением

АЧТ (рис. 1, б). Это излучение *не зависит от материала* полости и определяется только температурой и длиной волны. Вследствие этого, излучение АЧТ обладает *универсальным* характером и играет фундаментальную роль в физике.

Закон Кирхгофа. Для любого тела отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральному коэффициенту поглощения равно спектральной плотности энергетической светимости АЧТ при той же температуре и длине волны:

$$M_{\lambda}/\alpha = M_{\lambda, \text{АЧТ}}.$$

Согласно закону Кирхгофа, имеем

$$M_{\lambda} = \alpha M_{\lambda, \text{АЧТ}}.$$

Следовательно, реальные тела, коэффициент поглощения α которых всегда меньше единицы, излучают меньше, чем АЧТ при той же температуре и одинаковой длине волны. Кроме того, чем больше тело поглощает на некоторой длине волны (т.е. чем оно темнее в отраженном свете), тем больше оно будет излучать в нагретом состоянии на данной длине волны.

Закон излучения Планка (основной закон теплового излучения АЧТ). Спектральная плотность энергетической светимости (испускающая способность) АЧТ является следующей функцией длины волны и температуры:

$$M_{\lambda, \text{АЧТ}} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{\lambda kT}\right] - 1} \quad (1)$$

где h - *постоянная Планка*; c - скорость света в вакууме; k - постоянная Больцмана.

При постоянной температуре зависимость (1) описывает *спектр* теплового излучения АЧТ, т.е. распределение энергии излучения по длинам волн, примеры которого представлены на рис. 2, а для двух температур. Как видно из рис. 2, а, излучение имеет сплошной протяженный спектр с максимумом на некоторой длине волны $\lambda_{\text{макс}}$. Полезно запомнить, что примерно 90% энергии излучается в интервале длин волн от $0,5\lambda_{\text{макс}}$ до $3\lambda_{\text{макс}}$ (рис. 2, б).

Разрабатывая теорию теплового излучения АЧТ (1900 г.), Планк выдвинул *квантовую гипотезу*, согласно которой атомные осцилляторы испускают электромагнитные волны не непрерывно, как следовало из теории Максвелла, а порциями, *квантами*, энергия которых пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

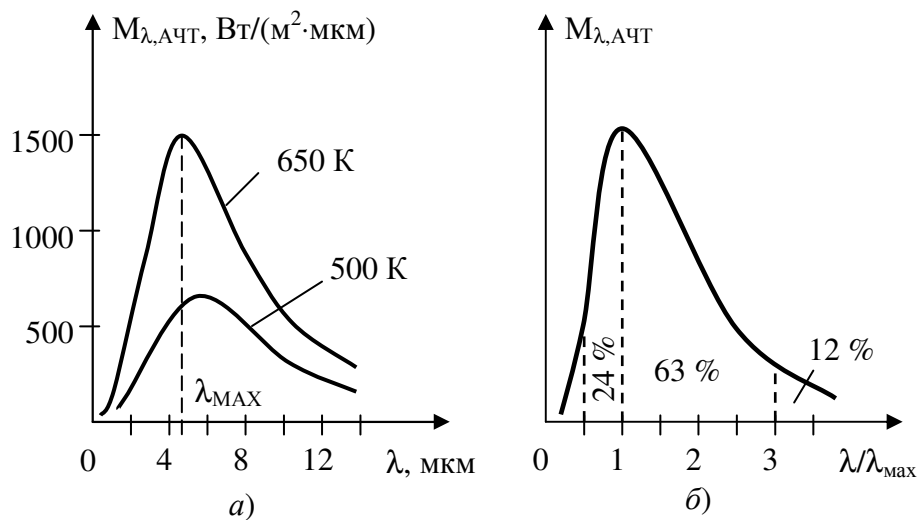


Рис. 2.

Спектр теплового излучения АЧТ: *a* – спектры для различных температур излучателя;

Постоянная Планка, как следует из опытов, равна $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Только с помощью квантовой гипотезы удалось теоретически объяснить наблюдаемый спектр излучения АЧТ.

В дальнейшем квантовая гипотеза получила подтверждение и развитие в работе Эйнштейна по объяснению внешнего фотоэффекта. Согласно Эйнштейну, само электромагнитное излучение состоит из таких квантов, получивших название *фотонов*. В опытах А. Комптона по рассеянию рентгеновских лучей было установлено, что фотоны подчиняются тем же кинематическим законам, что и частицы вещества, в частности, для излучения с частотой ν фотон обладает также и импульсом

$$p = \frac{h\nu}{c}.$$

В результате развития квантовой механики, когда выяснилось, что электрон обладает волновыми свойствами, стало ясно, что фотоны принципиально не отличаются от других элементарных частиц.

Закон смещения Вина. Как видно из рис. 2, *a*, спектральная плотность энергетической светимости максимальна на некоторой длине волны $\lambda_{\text{макс}}$, зависящей от температуры. Вин теоретически установил, что для АЧТ эта длина волны обратно пропорциональна температуре:

$$\lambda_{\text{MAX}} = \frac{b}{T}, \quad (2)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ К·м есть *постоянная Вина*. Например, при температуре 290 К $\lambda_{\text{макс}} = 10$ мкм. Следовательно, при комнатной температуре тела излучают примерно 90% энергии в диапазоне длин волн от 5 мкм до 30 мкм, т.е. в ИК диапазоне. На поверхности Солнца температура примерно в 20 раз больше, а длина волны, соответственно, в 20 раз меньше: $\lambda_{\text{макс}} = 0,5$ мкм; она соответствует зеленому свету.

Закон Стефана-Больцмана. Для абсолютно черного тела энергетическая светимость (мощность излучения с единицы площади на всех длинах волн) пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры тела:

$$M_{\text{АЧТ}} = \sigma \cdot T^4 \quad (3)$$

Коэффициент пропорциональности $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴ называют *постоянной Стефана-Больцмана*. Поток излучения с площади S черного тела равен

$$\Phi_{\text{АЧТ}} = S M_{\text{АЧТ}} = S \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (4)$$

Например, при комнатной температуре (295 К) поток излучения АЧТ с одного квадратного метра поверхности равен 429 Вт, а при температуре 2950 К - он в 10^4 раз больше.

Законы Вина и Стефана-Больцмана, открытые ранее закона Планка (1), следуют из последнего. Так, закон Стефана-Больцмана может быть получен интегрированием функции (1) по длине волны от нуля до бесконечности [1, 2]:

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4.$$

При этом получают, что постоянная Стефана-Больцмана связана с другими физическими константами соотношением:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}.$$

Численное значение h впервые было получено Планком по этой формуле, используя известные из опытов значения σ и других констант.

3. Излучение реальных тел.

На практике большой интерес представляет излучение различных реальных тел, для которых спектральный коэффициент поглощения α , в общем случае, зависит от длины волны и температуры [5-6]. Согласно закону Кирхгофа, спектр излучения реальных тел будет отличаться от спектра АЧТ (см. формулу (1)), а энергия излучения будет меньше.

Поясним сказанное на примере вольфрама, из которого изготавливают нити ламп накаливания. Зависимость коэффициента поглощения вольфрама от длины волны при температуре 2450 К показана на рис. 3, а. Из него видно, что α убывает с ростом λ : коэффициент по-

глощения в видимой области спектра больше, чем в инфракрасной. На рис. 3, б для температуры 2450 К показаны зависимости от λ спектральной плотности энергетической светимости АЧТ (кривая 1) и вольфрама (кривая 2).

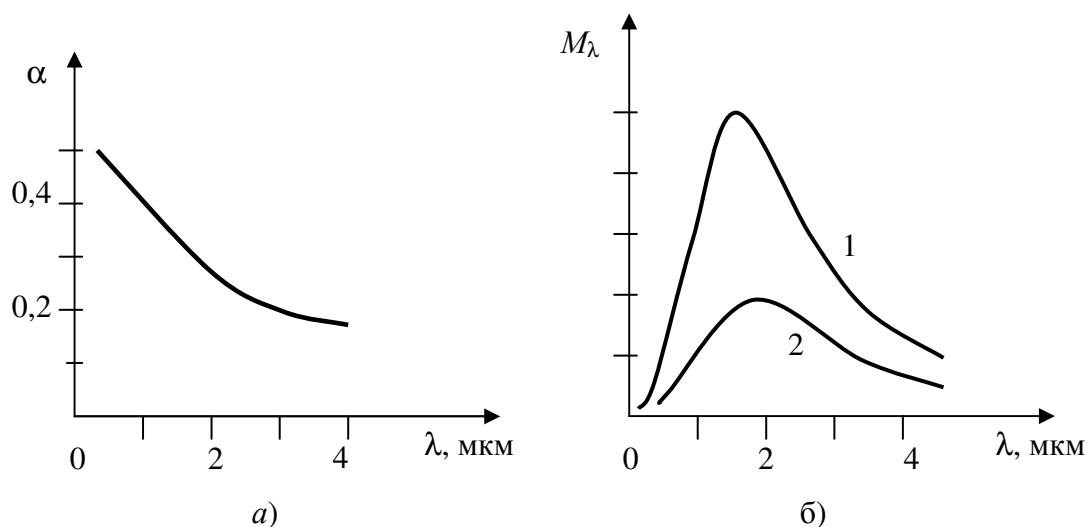


Рис. 3

a – зависимость коэффициента поглощения вольфрама от длины волны при $T = 2450$ К; *б* – спектральная плотность энергетической светимости при 2450 К для АЧТ (1) и вольфрама (2)

Во-первых, из графика рис. 3, б видно, что на видимую область спектра (0,4 – 0,76 мкм) приходится незначительная часть энергии излучения, большая часть которой испускается в ИК диапазоне. Отсюда следует низкий световой КПД лампы накаливания. Если температуру повысить, то спектр излучения сместится в видимую область, а КПД возрастет. Однако существенное повышение температуры и КПД невозможно, так как при этом быстро уменьшается срок службы лампы.

Во-вторых, на всех длинах волн вольфрам излучает меньше, чем АЧТ. Однако испускательная способность вольфрама в видимой области спектра ближе к испускательной способности АЧТ, чем в ИК диапазоне. Благодаря этому, энергия излучения выгодно перераспределяется по спектру в пользу видимого света за счет ИК излучения. Если бы у вольфрама коэффициент поглощения не зависел от λ , то КПД лампы был бы еще меньше.

Для некоторых тел, называемых *серыми*, коэффициент поглощения меньше единицы, но слабо зависит от длины волны в некоторой существенной области спектра. Поэтому спектр излучения серых тел близок к спектру АЧТ, а энергия излучения – меньше. Для серых тел приближенно и в ограниченной области температур закон Стефана-Больцмана имеет вид:

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (5)$$

Безразмерный множитель $\varepsilon < 1$, называемый *коэффициентом излучения* (*коэффициентом черноты*), зависит от вещества и состояния поверхности тела; он равен, например, 0,04...0,06 – для полированного алюминия, 0,25 – для сильно окисленного алюминия, 0,6...0,9 – для кирпича [5-6].

4. Методика лабораторного опыта

В данной работе изучают следующий вопрос: как поток излучения лампы накаливания возрастает с увеличением температуры вольфрамовой нити. Полученные данные анализируют и сравнивают с законом Стефана-Больцмана.

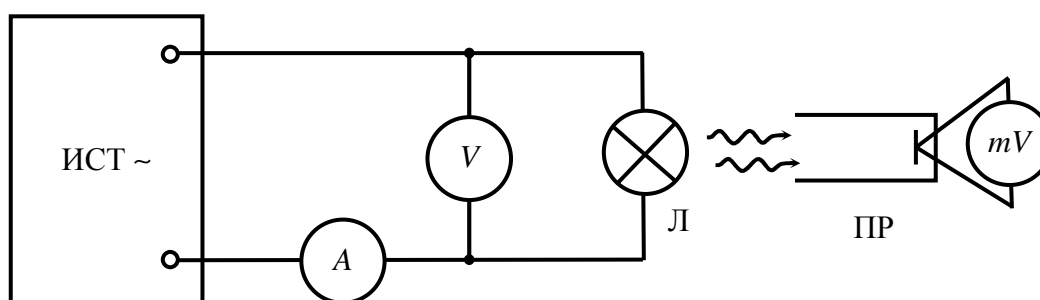


Рис. 4.

Схема лабораторной установки: ИСТ – источник питания лампы; Л – лампа накаливания; А – амперметр; V – вольтметр; ПР – тепловой приемник излучения лампы; mV – милливольтметр

Схема лабораторной установки показана на рис. 4. Источником теплового излучения служит вольфрамовая лампа накаливания Л. Лампа питается от источника ИСТ переменного тока, напряжение которого можно плавно изменять. При увеличении напряжения повышается температура нити накала. Интенсивность теплового излучения лампы измеряют приемником излучения ПР, к которому подключен регистрирующий милливольтметр mV . Сопротивление лампы в рабочем состоянии находят по закону Ома, измерив вольтметром V напряжение на лампе и амперметром А – силу тока. По результатам измерения сопротивления, зависящего от температуры нити, находят температуру нити накала.

1.1. Методика измерения температуры нити накала. Сопротивление лампы возрастает примерно в десять раз при изменении температуры нити от комнатной до температуры в режиме нормального накала. Такое значительное изменение сопротивления позволяет достаточно точно найти температуру нити, используя результаты измерения сопротивления R лампы и известную зависимость сопротивления вольфрама от температуры t в градусах Цельсия:

$$R = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2), \quad (6)$$

где R_0 – сопротивление при $t = 0^\circ\text{C}$, $\alpha = 4,82 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $\beta = 6,67 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$.

Из формулы (6) следует выражение для расчета температуры T нити в шкале Кельвина по результатам измерения ее сопротивления R в нагретом состоянии:

$$T = 273 + \frac{1}{2\beta} \left[\sqrt{\alpha^2 + 4\beta \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right)} - \alpha \right]. \quad (7)$$

Сопротивление R нагретой нити вычисляют по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (8)$$

где U – напряжение на лампе, I – сила тока лампы. Сопротивление R_0 измерено в отдельном опыте (см. Приложение 1), полученное значение R_0 приведено на установке.

Подставляя в формулу (7) числовые значения коэффициентов α и β , получим выражение для расчета температуры:

$$T = 273 + 7396,45 \left[\sqrt{0,2323 + 0,02704 \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right)} - 0,482 \right]. \quad (9)$$

1.2. Методика измерения потока излучения. Рассмотрим методики измерения потока излучения и проверки закона Стефана-Больцмана, а также принцип действия приемника излучения, который называют *тепловым приемником*.

Принцип действия теплового приемника простой. Измеряемое излучение поглощается некоторым телом, температура которого возрастает. Приращение температуры Δt регистрируют, а поглощаемый поток излучения пропорционален Δt . Таким способом можно измерять интенсивность различных излучений.

В лабораторной установке тепловой приемник состоит из небольшой тонкой металлической пластинки, электрического термометра для измерения приращения температуры пластинки при ее освещении лампой и регистрирующего прибора. Пластинка зачернена, чтобы падающее на нее излучение (видимое и инфракрасное) практически полностью поглощалось.

В качестве первого приближения будем считать, что лампа накаливания излучает как серое тело, для которого закон Стефана-Больцмана описывается формулой (5). Тогда при температуре вольфрамовой нити T приемник поглощает поток излучения, пропорциональный энергетической светимости M серого тела (см. формулу (5)):

$$\Phi = k_1 \varepsilon \sigma T^4. \quad (10, a)$$

Коэффициент пропорциональности k_1 зависит от геометрических условий измерения – размеров излучающего тела и приемной площадки (пластинки), а также от расстояния между ними.

В «поле зрения» приемника попадают, помимо лампы, посторонние тела при комнатной температуре. Излучение посторонних тел учтем, добавив в формулу (10, а) величину φ :

$$\Phi_T = k_1 \varepsilon \sigma T^4 + \varphi. \quad (10, б)$$

Когда лампа выключена, она имеет комнатную температуру T_0 . При этом лампа излучает невидимое глазом тепловое излучение, а приемник поглощает, согласно формуле (10, б), поток излучения

$$\Phi_0 = k_1 \varepsilon \sigma T_0^4 + \varphi.$$

При включении лампы поглощенный поток излучения возрастает на величину

$$\Delta\Phi = \Phi_T - \Phi_0 = k_1 \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4).$$

Рассмотрим температуру пластинки теплового приемника, которую будем обозначать буквой t . Когда лампа выключена, пластинка имеет комнатную температуру t_0 . Если лампа включена, температура пластинки повышается и через некоторое время достигает равновесного значения t . Равновесие состоит в том, что за одинаковое время пластинка поглощает столько же энергии, сколько и отдает ее в результате теплопередачи более холодным окружающим телам.

Приращение температуры $\Delta t = t - t_0$ пропорционально приращению $\Delta\Phi$ поглощенного потока излучения:

$$\Delta t = k_1 k_2 \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4). \quad (11)$$

Коэффициент пропорциональности k_2 зависит от условий передачи теплоты от нагретой пластинки окружающим телам.

Приращение Δt температуры пластинки измеряют термостолбиком (см. Приложение 2), к которому подключен регистрирующий прибор – милливольтметр. Напряжение термостолбика U_{therm} , измеряемое милливольтметром, пропорционально Δt :

$$U_{therm} = k_3 \Delta t, \quad (12)$$

где k_3 – коэффициент пропорциональности. Подстановкой формулы (12) в формулу (11) получим следующее выражение:

$$U_{therm} = k_1 k_2 k_3 \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4). \quad (13)$$

В лабораторной работе анализируются результаты измерений, когда температура T нити лампы заметно выше комнатной температуры T_0 . Поэтому формулу (13) можно упростить, пренебрегая малым слагаемым T_0^4 :

$$U_{therm} = k_1 k_2 k_3 \varepsilon \sigma T^4. \quad (14)$$

При выводе формулы (14) мы предполагали, что вольфрамовая лампа накаливания излучает как серое тело, для которого поток излучения пропорционален температуре в четвертой степени (см. формулу (5)).

Однако, как видно из рис. 3, а для коэффициента поглощения α вольфрама, вольфрам не является серым телом: значение α возрастает с уменьшением длины волны. С увеличением температуры вольфрама спектр излучения смещается в сторону более коротких волн (см. закон смещения Вина), на которых коэффициент поглощения α (а, следовательно, и коэффициент излучения - формуле (5)) возрастают. Поэтому есть основания ожидать, что результаты лабораторной работы с лампой накаливания в качестве излучателя не будут точно следовать зависимости:

$$U_{therm} \sim T^4.$$

Скорее следует ожидать, что показатель степени в формуле (14), который обозначим n , будет больше четырех. Поэтому запишем формулу (14) в более общем виде:

$$U_{therm} = k_1 k_2 k_3 \epsilon \sigma T^n. \quad (15)$$

Логарифмируя выражение (15), получим следующую формулу:

$$\lg U_{therm} = n \lg T + Const. \quad (16)$$

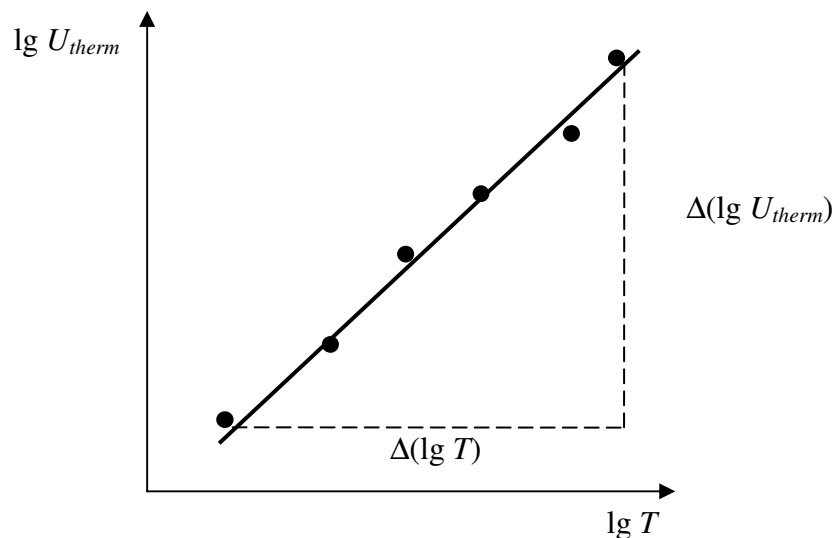


Рис.5
Образец графического представления результатов измерения

В лабораторной работе измеряют температуру T излучателя и «выходной сигнал» приемника U_{therm} . По результатам измерений строят графическую зависимость $\lg U_{therm}$ от $\lg T$ (рис.5). Если на опыте выполняется степенная зависимость (15), то экспериментальные точки на графике будут ложиться на прямую линию, как показано на рис. 5. Используя построенный график, находят приращения $\Delta(\lg U_{therm})$ и $\Delta(\lg T)$, показанные на рис. 5, и вычисляют показатель степени n в законе Стефана-Больцмана для вольфрамовой лампы накаливания:

$$n = \Delta(\lg U_{therm}) / \Delta(\lg T). \quad (17)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Выполнение лабораторной работы

Задание 1. Ознакомление с лабораторной установкой.

Основными элементами лабораторной установки являются лампа накаливания, источник питания лампы, тепловой приемник и три измерительных прибора (см. рис. 4). Лампа и приемник должны быть установлены на оптической скамье.

Для измерения силы тока лампы и напряжения на лампе используются мультиметры типа *Peac Tech 2010 DMM*, для которых ниже приведено описание.

Выходное напряжение приемника U_{therm} необходимо измерять значительно более чувствительным мультиметром *AM-1109*. Мультиметр имеет два канала измерений. В работе используют канал «СН1». Красная клемма приемника должна быть соединена с гнездом «UΩ», а черная клемма – с гнездом «com» мультиметра.

Порядок выполнения задания.

1. Проверить установку деталей на оптической скамье. Стекланный тепловой фильтр, прилагаемый к приемнику, должен быть снят. На корпус приемника должна быть надета длинная черная трубка (бленда) для уменьшения засветки. Прямые солнечные лучи не должны падать на приемник. Расстояние между блендой и лампой должно составлять примерно 10 см. Осевая линия приемника должна быть направлена точно на нить лампы, а нить лампы перпендикулярна этой оси. Все стопорные винты должны быть подтянуты.

2. Проверить соответствие электрического монтажа схеме на рис. 6. Источник ИСТ питания лампы имеет несколько выходных гнезд. Лампа питается переменным напряжением, снимаемым с гнезд «0...15 V~». Напряжение можно плавно изменять от 0 до 15 В, вращая ручку 1. Вокруг ручки нанесены две шкалы напряжений – внешняя шкала 0...15 V~ для переменного напряжения и внутренняя шкала 0...10 V = для постоянного напряжения.

К амперметру А провода должны быть подключены к гнездам «20 А» и «com» (см. рис. 6). Поворотный переключатель амперметра должен быть установлен в положение «20 А».

К вольтметру для измерения напряжения лампы провода должны быть соединены с гнездами «com» и «UΩHz». Поворотный переключатель вольтметра должен быть установлен в положение «20 V».

3. **ВНИМАНИЕ !** В лабораторной установке используется лампа накаливания на номинальное напряжение 6 В. При этом она подключена к регулируемому источнику питания,

напряжение которого можно увеличивать до 15 В. При предельных напряжениях лампа перегорит. Необходимо внимательно следить за напряжением на лампе, используя вольтметр и шкалу на источнике питания. Линия, нанесенная на ручке регулировки напряжения, не должна заходить за точку 2 на шкале (см. рис. 6). Этой точке соответствует напряжение примерно 8 В по внешней шкале.

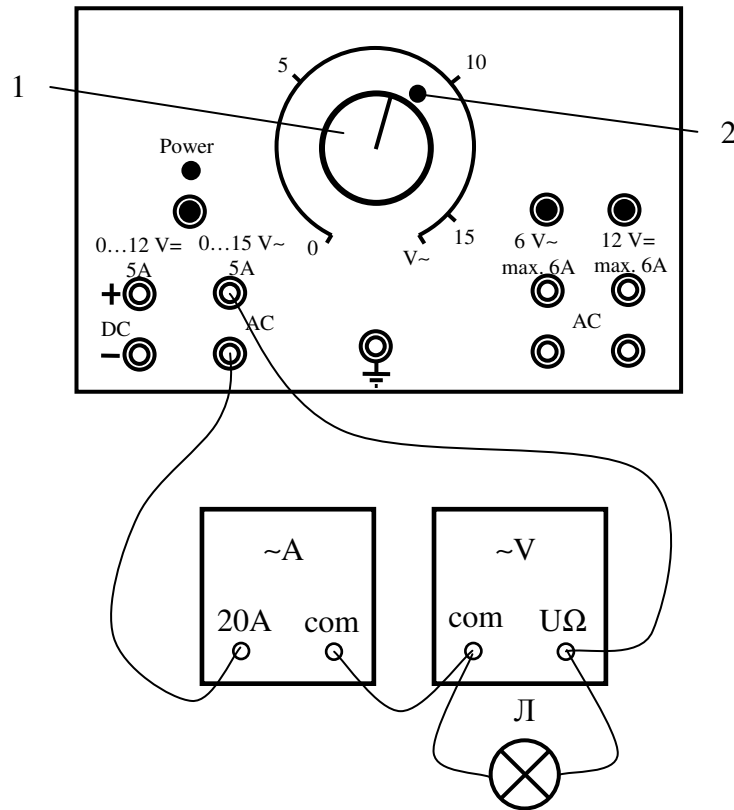


Рис. 6.

Монтажная схема питания лампы и измерения напряжения и силы тока.

4. Повернуть ручку 1 регулировки напряжения на «ноль» (см. рис. 6).

5. Включить питание мультиметров для измерения напряжения и тока лампы, нажав клавишу «power».

6. В мультиметрах для измерения напряжения и тока нажать клавишу «AC/DC» для установки режима измерения переменных токов. При этом на индикаторе приборов должен быть символ «~» или AC.

7. В мультиметре для измерения напряжения приемника установить правый поворотный переключатель из положения «OFF» (выключено питание) в положение «=mV» для измерения малых постоянных напряжений в единицах мВ. При этом должен включиться индикатор.

8. **ВНИМАНИЕ!** Пригласить дежурного по лаборатории инженера для проверки правильности подготовки установки к работе. Пробное включение установки необходимо производить только совместно с инженером под его наблюдением.

9. Подключить сетевой шнур источника питания лампы к сети. Включить сетевое питание лампы выключателем, расположенным на задней стенке источника питания. При этом должен загореться световой индикатор «Power».

10. Медленно увеличивать напряжение на лампе, вращая регулятор напряжения 1 источника питания (см. рис. 6). Следить за величиной напряжения, используя вольтметр и внешнюю шкалу 0...15 регулятора напряжения. Установить для начала измерений ток лампы 2 А (при этом напряжение на лампе примерно 1 В).

Задание 2. Выполнение измерений.

Порядок выполнения задания.

1. Подготовить таблицу 1 для записи результатов измерений.

Таблица 1

Результаты измерений

| $I, \text{ А}$ | $U, \text{ В}$ | $U_{therm},$ мВ | $R, \text{ Ом}$ | R / R_0 | $T, \text{ К}$ | $\lg T$ | $\lg U_{therm}$ |
|----------------|----------------|--------------------|-----------------|-----------|----------------|---------|-----------------|
| | | | | | | | |

Примечания. 1) Таблица содержит примерно 5...7 строк. 2) $R_0 = \dots$

2. Записать в примечания к табл. 1 значение сопротивления R_0 данного экземпляра лампы при нулевой температуре (приведено на установке).

3. Записать в табл. 1 результаты измерения мультиметрами: напряжение U и силу тока I лампы (для первого измерения примерно 2 А), напряжение приемника U_{therm} .

4. Увеличить силу тока примерно на 0,5 А. Выждать не менее 2 минут, необходимых для установки теплового равновесия в лампе и в приемнике. Измерить величины U, I и U_{therm} . Результаты измерений записать в табл. 1.

5. Повторить измерения п. 4 при силе тока примерно равной 3 А, 4 А и 5 А. Результаты измерений записать в табл. 1. При силе тока 5 А напряжение на лампе может составлять от 6 до 7 В.

6. Выключить установку. Регулятор напряжения источника питания повернуть на «нуль». Выключить сетевой тумблер источника питания, вытащить сетевую вилку из розетки. Выключить питание мультиметров.

2. Обработка результатов измерений

1. По результатам измерений силы тока и напряжения лампы (см. табл. 1) вычислить по закону Ома (см. формулу (8)) сопротивление лампы R . Результат вычисления записать в табл. 1.
2. Вычислить отношение R / R_0 , где R_0 – сопротивление при нулевой температуре в шкале Цельсия (приведено на установке).
3. Вычислить по формуле (9) температуру нити лампы.
4. Вычислить десятичные логарифмы $\lg T$ и $\lg U_{therm}$.
5. На большом листе миллиметровой бумаги построить графическую зависимость величины $\lg U_{therm}$ от величины $\lg T$ (см. рис. 5). Экспериментальные точки нанести на график отчетливо видимыми значками. Через экспериментальные точки провести наилучшую прямую.
6. Если точки хорошо ложатся на прямую, то результаты опыта согласуются со степенной зависимостью (см. формулу (15)).
7. Используя построенный график, вычислить отношение $n = \Delta(\lg U_{therm}) / \Delta(\lg T)$ (см. формулу (17) и пояснение на рис. 5). Значения $\Delta(\lg U_{therm})$, $\Delta(\lg T)$ и n записать в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения показателя степени в законе Стефана-Больцмана для лампы накаливания

| $\Delta(\lg T)$ | $\Delta(\lg U_{therm})$ | n |
|-----------------|-------------------------|-----|
| | | |

8. Сделать выводы. Если полученное значение n отличается от $n = 4$ в законе Стефана-Больцмана, предложить возможные объяснения наблюдаемого отклонения.

Контрольные вопросы

1. Что такое тепловое излучение?
2. В чем состоят отличия теплового излучения от люминесценции?
3. Что такое энергетическая светимость и спектральная плотность энергетической светимости? Какая связь между ними?
4. Какое тело является хорошей моделью АЧТ?
5. Сформулируйте законы теплового излучения.
6. В чем состоит квантовая гипотеза Планка?
7. Напишите выражения для энергии и импульса фотона.
8. В чем состоят отличия теплового излучения реальных тел от излучения АЧТ ?

Список литературы

1. *Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В.* Квантовая физика. М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 496 с.
2. *Иродов И.Е.* Квантовая физика. Основные законы. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001 –272 с.
3. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. М.: Высш. школа, 2000.
4. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3-х т. Т. 3. М.: Наука, 1987.
5. *Бураковский Т., Гизиньский Е., Саля А.* Инфракрасные излучатели. Л.: Энергия, 1978.
6. *Криксунов Л.З.* Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978.

Приложение 1

Определение сопротивления R_0 лампы при температуре 0°C

Для каждого экземпляра лампы необходимо измерить сопротивление R_{20} лампы при комнатной температуре (примерно 20°C). Для этого отключить лампу от рабочей схемы и присоединить к гнездам «com» и «U Ω » мультиметра АМ-1109. Измерение выполнять на канале СН-1. Сопротивление при нулевой температуре вычислить по формуле: $R_0 = 0,9 R_{20}$.

Приложение 2

Термопара

Термопара (термоэлемент) состоит из двух соединенных между собой разнородных металлических проводников. Типичная термопара, состоящая из двух специально подобранных сплавов – хромеля и копелья, показана на рис. 7. Двумя медными проводниками термопара соединена с милливольтметром мВ. Контакт a хромеля и копелья примыкает к нагреваемой пластинке теплового приемника и имеет его температуру t , а контакты $b\bar{b}$ с медными проводами примыкают к массивной пластинке с комнатной температурой t_0 .

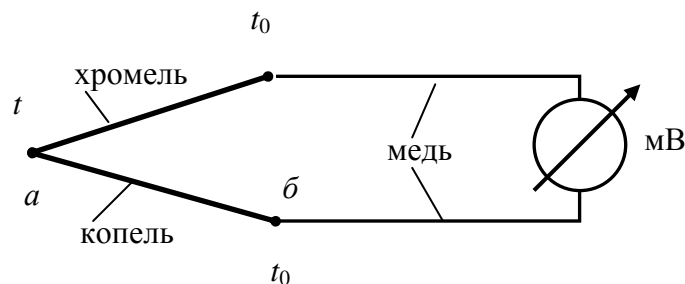


Рис. 7

Схема термопары (термоэлемента)

Действие термопары основано на *эффекте Зеебека*: при различной температуре спаев a и \bar{b} в цепи возникает термоЭДС, величина которой зависит только от температур горячего и холодного контактов и от материалов проводников. При небольшой разности температур $\Delta t = t - t_0$, характерной для приемников излучения, термоЭДС $U_{therm} = k_3 \Delta t$. Коэффициент k_3 зависит от материалов проводников и интервала температур. Например, для термопары хромель-копелья при комнатной температуре $k_3 = 62$ мкВ/К.

В случае малой разности температур несколько термопар включают последовательно для увеличения термоЭДС. В этом случае термоэлемент называют *термостолбиком*.