

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой общей физики ФТИ

_____ А.М. Лидер
« ____ » _____ 2017 г.

**Изучение явления теплового излучения. Закон
Стефана-Больцмана.**

Методические указания к выполнению лабораторной работы
3-04 по курсу «Общая физика» для студентов всех
направлений и специальностей

Составители **В.С. Сыпченко, Т.С. Прямушко, Т.И.
Спиридонова, Чжан Хунжу**

Издательство
Томского политехнического университета
2017

УДК 537
ББК 22.2

Изучение явления теплового излучения. Закон Стефана-Больцмана: методические указания к работе ХХХ по курсу «Общей физики» для студентов всех направлений и специальностей / сост. В.С. Сыпченко, Т.С. Прямушко, Т.И. Спиридонова, Чжан Хунжу; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 16 с.

УДК 537
ББК 22.2

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
Общей физики ФТИ
«_____» 2017 г.

Председатель
учебно-методической комиссии _____ *А.М. Лидер*

Рецензенты

Доктор педагогических наук,
профессор кафедры ОФ ФТИ НИ ТПУ

В.В. Ларионов

Старший преподаватель
кафедры ОФ ФТИ НИ ТПУ

Т.Н. Мельникова

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ЗАКОН СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Цель работы: изучить явление теплового излучения, исследовать зависимость плотности потока излучения тела от температуры нагретого тела.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка «Кобра 3» (блок питания, блок усиления), термочувствительный элемент, соединительные провода, элемент сопротивления 100 Ом, 3 мультиметра, лампа накаливания.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Равновесное излучение в полости

Излучение света происходит в результате перехода атомов, молекул из состояний с большей в состояния с меньшей энергией. Такое излучение называется тепловым (или температурным) и оно отличается от других видов излучения (люминесценции) только способом перехода излучающих систем из возбужденного состояния. В данном случае переход осуществляется в результате теплового движения молекул и атомов.

В теории теплового излучения вводится понятие равновесного излучения. Если излучающее тело поместить в замкнутую вакуумную полость с идеально отражающими зеркальными стенками, то излучение тела не уходит в бесконечность, а остается в полости. При равной температуре полости, тела и окружающего пространства излучающее тело и излучение в полости не будут терять энергию в окружающее пространство. Энергия данной системы содержится частично в виде внутренней энергии излучающего тела и в виде энергии излучения (электромагнитных волн). Из термодинамики следует, что в рассматриваемой равновесной термодинамической системе должно существовать равновесие между телом (веществом) и его излучением, т.е. тело будет в единицу времени терять на излучение столько же энергии, сколько поглощать ее от падающего на него излучения из полости (иначе температура не оставалась бы постоянной). Такое равновесное состояние является устойчивым. В общем случае тело испускает излучение всех частот. Распределение энергии электромагнитного излучения в полости по частотам (длинам волн) характеризуется определенной функцией, зависящей только от

температуры тела и не зависящей от конкретной природы (стекло, керамика, металл и т.д.). На практике чаще всего приходится иметь дело с излучающими телами, не находящимися в равновесии с их собственным излучением. Справедливости ради следует подчеркнуть, что для очень многих тел (тел, не способных люминесцировать) это обстоятельство не очень существенно и не приводит к значительному отклонению характеристик излучения от того, какое наблюдалось бы для того же тела в строго равновесных условиях.

Неравновесность условий излучения заключается в том, что самый наружный слой тела, отдающий энергию вовне, и не получающий эквивалентного количества энергии от внешнего излучения, не находится в равновесных условиях. Он не может быть охарактеризован температурой, присущей остальному объему тела.

На практике отклонение от равновесия в приповерхностном слое невелико, и состояние этого слоя можно описать определенной температурой. Теперь нужно определить величину этого слоя. Толщину этого слоя можно принять равной глубине проникновения излучения в данный материал. Как сделать такое заключение? Очевидно, что другое предположить невозможно. Далее следует понять, что излучение затухает на расстоянии, равном длине волны, так что приповерхностный слой очень тонок. В большинстве металлов равновесное состояние устанавливается очень быстро (10^{-13} с). Поэтому поверхностный слой, находящийся в контакте с термостатирующим его объемом металла, находится практически в равновесном состоянии, несмотря на огромный расход энергии на излучение. Благодаря малой толщине поверхностного слоя и большой теплопроводности металла, температура на поверхности почти такая же, как в объеме.

В случае частично прозрачных материалов, например тех, которые используются в рекламных целях, на толщине слоя, равном глубине проникновения излучения, величина градиента температуры может быть существенной. Здесь следует учесть рассмотренную роль поверхностного слоя. Следует заметить, что и в случае прозрачных материалов распределение энергии по степеням свободы всюду квазиравновесно, что является необходимым и достаточным условием того, чтобы излучение тела было близко к тепловому (равновесному). Излучение, вызываемое не нагреванием, а любым другим способом, не будет равновесным.

АБСОЛЮТНО ЧЕРНОЕ ТЕЛО. ЗАКОН КИРХГОФА

Тепловое или термодинамически равновесное излучение подчиняется некоторым общим закономерностям, вытекающим из термодинамики. Фундаментальными законами теплового излучения, опирающимися на принципы термодинамики, являются закон Кирхгофа (1859) и закон Стефана – Больцмана (1896). Тепловое излучение в общем фундаментальном значении для кардинального изменения концепций физики имеет принципиальнейшее значение, так как теория теплового излучения объединила термодинамику и оптику и занимает среди объединительных идей физики важное место.

Для записи закона Кирхгофа рассмотрим два понятия.

1. Интегральная излучательная способность тела при данной температуре E_T (или плотность потока излучения). Это поток энергии, испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям в сферическое полупространство. Величина E_T соответствует фотометрическому понятию *энергетической светимости*. Поскольку всегда имеет место то или иное распределение испускаемой энергии по частотам (длинам волн), вводится еще понятие спектральной излучательной способности $E_{\nu T}$, соответствующей мощности, испускаемой телом с единицы площади в единичном интервале частот (Вт/см²·Гц). Аналогично определяется спектральная излучательная способность в шкале длин волн $E_{\lambda T}$. Мощность, излучаемая с единицы площади в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$ или от λ до $\lambda + d\lambda$, запишется как $E_{\nu T} d\nu$ или $E_{\lambda T} d\lambda$, а интегральная излучательная (испускаемая) способность

$$E_T = \int E_{\nu T} d\nu = \int E_{\lambda T} d\lambda \quad (1)$$

2. Поглощательная способность тела при данной температуре определяется как отношение поглощенной части падающего на тело потока излучения $E_{\text{погл}}$, которая поглощается телом (превращается в тепло), ко всему падающему потоку $E_{\text{пад}}$

$$A = E_{\text{погл}} / E_{\text{пад}} \quad (2)$$

Опыт показывает, что поглощательная способность тел в разных спектральных интервалах различна, т.е. для более детального описания рассматриваемого свойства тел поглощать электромагнитные волны необходимо ввести еще спектральную поглощательную способность:

$$A_{\nu T} = dE_{\nu T \text{ погл}} / dE_{\nu T \text{ пад}} \quad (3)$$

$$A_{\lambda T} = dE_{\lambda T \text{ погл}} / dE_{\lambda T \text{ пад}}, \quad (4)$$

где $dE_{\text{впад}}$ и $dE_{\lambda T \text{впад}}$ – «монохроматические» потоки падающего излучения, а точнее, потоки в узких спектральных интервалах частот от ν до $\nu+d\nu$ или от λ до $\lambda+d\lambda$. Зная спектральную поглощательную способность $A_{\nu T}$ и распределение энергии по спектру в падающем потоке E_{ν} , можно найти часть потока, поглощаемого телом:

$$E_{\text{погл}} = \int_0^{\infty} A_{\nu T} dE_{\text{впад}} \quad (5)$$

Кирхгоф установил закон, согласно которому отношение спектральной испускательной и поглощательной способности не зависит от природы тела и для всех тел выражается одной и той же универсальной функцией частоты ν и температуры T $f(\nu, T) = E_{\lambda T}$.

Все тела, излучающие электромагнитную энергию, в той или иной степени поглощают энергию, передаваемую им излучением от других нагретых тел. Каждое тело характеризуют величиной, которая называется спектральной поглощательной способностью или коэффициентом поглощения $A_{\lambda T}$, в общем случае зависящим от температуры тела, от длины волны падающего излучения, а также от материала и свойств поверхности поглощающего тела. Коэффициент поглощения $A_{\lambda T}$ показывает, какая доля лучистой энергии, падающей за единицу времени на единицу поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$, поглощается данной поверхностью. Тело называют абсолютно черным (АЧТ), если у него при всех длинах волн $A_{\lambda T} = 1$. Если $A_{\lambda T} < 1$, то тела называют нечерными. Нечерные тела подразделяются на *серые* и *селективные*. У серых тел коэффициент поглощения имеет одинаковое значение для всех длин волн и зависит только от температуры и материала данного тела. У селективных тел $A_{\lambda T}$ изменяется, кроме того, в зависимости от длины волны. К селективным (т.е. избирательно поглощающим) относится большинство материалов, в том числе вольфрам и никель. Связь между спектральной излучательной и поглощательной способностью выражена законом Кирхгофа (5).

Согласно формуле Планка для энергии $E(\lambda, T)$, излучаемой через единицу площади поверхности АЧТ за единицу времени (плотность потока излучения) при абсолютной температуре T тела на интервале длин волн $(\lambda, \lambda+d\lambda)$, выполняется соотношение:

$$\frac{dE(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2c^2 \cdot h \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1}, \quad (6)$$

где c – скорость света ($c=3 \cdot 10^8$ м/с), h – постоянная Планка ($h=6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж с), k – постоянная Больцмана ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

После интегрирования формулы (1) по всем длинам волн от 0 до ∞ , получаем:

$$E(T) = \frac{2\pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} \cdot T^4, \quad (7)$$

или, в другой форме:

$$E(T) = \sigma \cdot T^4,$$

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

Данное соотношение носит название закона Стефана-Больцмана. Пропорциональность плотности потока излучения четвертой степени абсолютной температуры выполняется и для так называемого серого тела, коэффициент поглощения которого меньше единицы.

В данной работе в качестве серого тела выступает нить в лампе накаливания. Излучение от нити попадает на термоэлемент; при фиксированном расстоянии между лампой и термоэлементом термоЭДС $U_{терм}$ будет пропорциональна плотности потока излучения E_T от лампы, а значит, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры нити. В первом приближении можно записать:

$$U_{терм} = A \cdot T^4,$$

где A – некоторая величина, не зависящая от температуры. Логарифмируя это выражение, получим:

$$\lg U_{терм} = 4 \cdot \lg T + \lg A \quad (8)$$

Таким образом, степенную зависимость между термоЭДС и абсолютной температурой можно определить графически: откладывая полученные экспериментальные точки в осях $\lg U_{терм}$ и $\lg T$ и проведя линейную аппроксимацию. Показатель степени можно получить из тангенса угла наклона прямой.

Температуру нити накала можно определить, измеряя ее сопротивление R и используя зависимость сопротивления металла от температуры:

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2), \quad (9)$$

где R_0 – сопротивление при температуре 0 °С, для данной нити накаливания $\alpha = 4,82 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹, $\beta = 6,76 \cdot 10^{-7}$ К⁻², t – температура по шкале Цельсия, которая связана с абсолютной шкалой как:

$$T = 273 + t \quad (10)$$

Сопротивление нити накаливания R_0 при 0 °С можно определить через сопротивление R при комнатной температуре $t_{комн}$:

$$R_0 = \frac{R(t_{\text{комн}})}{1 + \alpha \cdot t_{\text{комн}} + \beta \cdot t_{\text{комн}}^2} \quad (11)$$

Используя формулы (9) и (10), получим:

$$T = 273 + \frac{1}{2\beta} \cdot \left[\sqrt{\alpha^2 + 4\beta \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right)} - \alpha \right] \quad (12)$$

Сопротивление нити накала R можно вычислить, используя закон Ома:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (13)$$

где U и I – напряжение и ток на лампе, соответственно.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

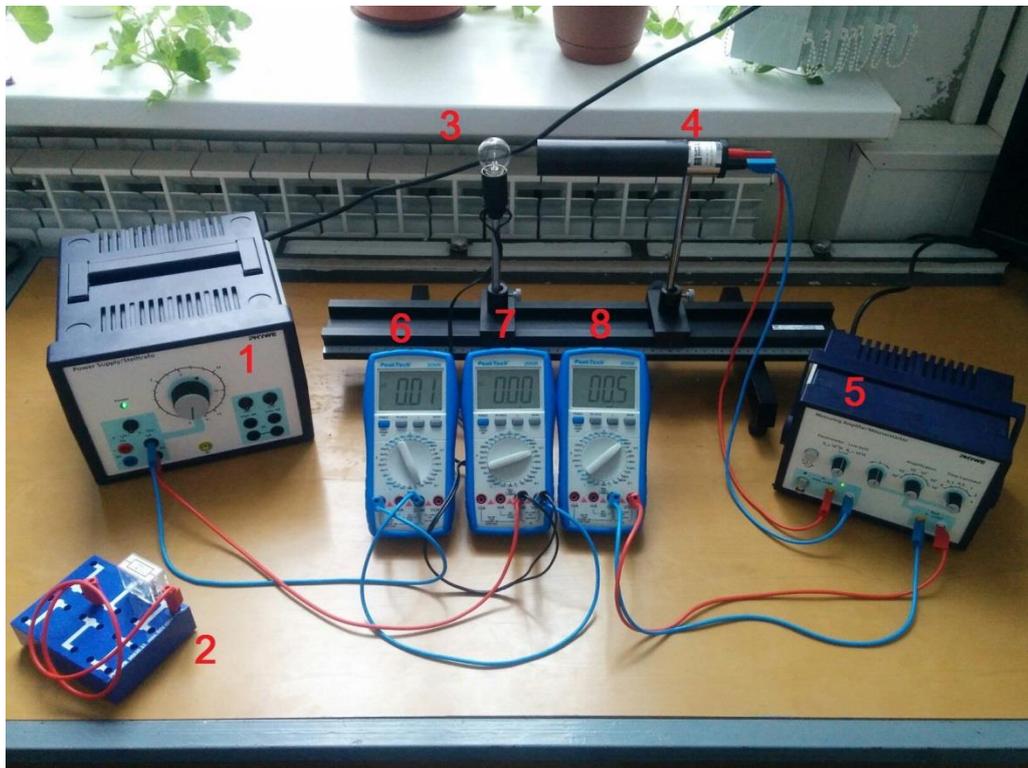


Рис. 1. Фотография установки: 1 – блок питания, 2 – элемент сопротивления 100 Ом, 3 – лампа накаливания, 4 – термочувствительный элемент, 5 – блок усиления, 6, 7, 8 – мультиметры

На рисунке 1 представлен общий вид установки, состоящий из: 1 блока питания (1), лампы накаливания (3), термочувствительного элемента (4), предназначенного для измерения яркостной температуры лампы накаливания, блока усиления (5), мультиметров (6) и (7) для измерения тока и напряжения в цепи, соответственно, и

мультиметра 8 для измерения напряжения выдаваемого с термочувствительного элемента. Для измерения сопротивления лампы накаливания используется соединительный блок (2) с сопротивлением 100 Ом. Термочувствительный элемент и лампа накаливания размещены на металлической станине на расстоянии 20 см.

Важно: лампа должна быть повернута по отношению к термочувствительному элементу, как показано на рисунке 2а.

На рисунке 2б представлена передняя панель блока усиления.



Рис. 2. а – положение лампы накаливания по отношению к термочувствительному элементу, б – панель управления усилителя

Меры предосторожности

Во избежание получения термических ожогов, строго запрещается трогать руками или перемещать лампу накаливания после подачи напряжения, а также в течение 10 минут после выключения установки.

Все необходимые операции по перемещению лампы накаливания производить только при выключенном источнике питания.

При высоких напряжениях накала на лампу не смотреть - ослепляет.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

Упражнение 1. Определение сопротивления нити накала лампы при температуре 0 °С.

1. Соберите установку как показано на рисунке 3. Убедитесь, что регулятор напряжения на блоке питания находится на отметке «0» (крайнее левое положение). Подключить блок питания и блок усиления к сети.

2. Включите блок питания и усиления, кнопка включения расположена на задней панели слева.

3. Включите мультиметры нажатием на кнопку «Power». Настройте амперметр на диапазон измерения тока 200 мА, вольтметры – 200 мВ. Используйте режим постоянного тока DC на блоке питания и мультиметрах (использовать кнопку «DC/AC»).

4. На блоке питания подать такое напряжение на лампу, чтобы ток через нее был равен $I=50$ мА. При таком слабом токе нагреванием нити накала лампы можно пренебречь, следовательно, можно измерить сопротивление нити накала лампы при комнатной температуре $R(t_{комн})$.

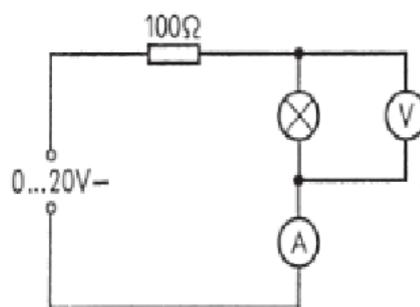
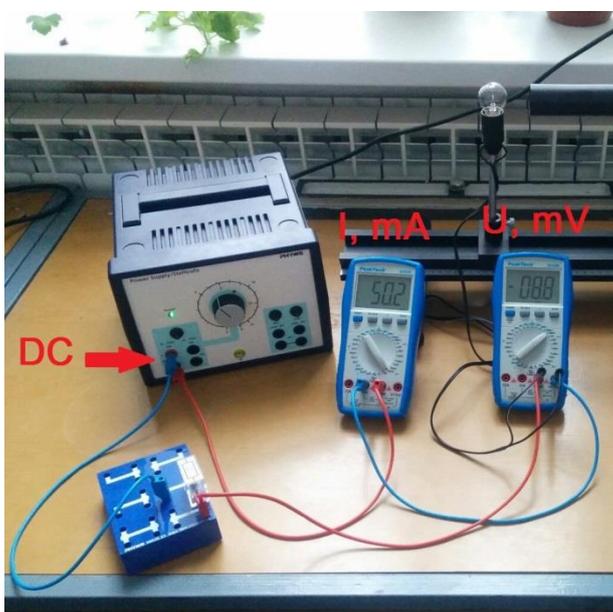


Рис. 3. Электрическая схема, используемая для определения сопротивления нити накала лампы

5. Полученные значения тока и напряжения запишите в таблицу 1.

Таблица 1

U , мВ	I , мА	$R(t_{комн})$, Ом	R_0 , Ом

6. По формуле (13) вычислить сопротивление нити накала лампы при комнатной температуре.

7. По формуле (11) вычислить сопротивление нити накала лампы при 0°C .

Упражнение 2. Определение степенной зависимости между энергией излучения нити накала лампы и ее температурой (проверка закона Стефана-Больцмана).

1. Соберите установку как показано на рисунке 4. Убедитесь, что регулятор напряжения находится на отметке «0» (крайнее левое положение). Подключить блок питания и блок усиления к сети.

2. Включите блок питания и усиления, кнопка включения расположена на задней панели слева.

3. Включите мультиметры, переключите их в режим AC – переменного тока (использовать кнопку «DC/AC») и установите следующие диапазоны измерения: $I - 200 \text{ mA}$, $U_2 - 20 \text{ V}$, $U_{\text{терм}} - 200 \text{ mV}$.

4. На блоке усилителя с помощью регулятора «0» аккуратно установите минимальное значение напряжения на мультиметре $U_{\text{терм}}$.

5. Проведите измерения напряжения накала лампы от 1 до 8 В, с шагом в 1 В, от температуры и запишите полученные значения с амперметра и вольтметров в таблицу 2.



Рис. 4. Схема установки для проверки закона Стефана-Больцмана

6. По формуле (13) вычислить сопротивление для каждого значения подаваемого напряжения. При вычислениях использовать значение $U_{терм}$. Полученные значения внести в таблицу 2.

Таблица 1.

U, В	I, мА	U ₂ , В	U _{терм} , мВ	R, Ом	T, К	lgT	lgU _{терм}
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

7. По формуле (12) вычислить значение температуры нити для каждого значения подаваемого напряжения. Полученные значения внести в таблицу 2.

8. Постройте график зависимости lgT от $lgU_{терм}$ и по угловому коэффициенту касательной определите значение показателя степени в законе Стефана-Больцмана.

9. Сравните полученное значение со степенным показателем в законе Стефана-Больцмана. Сделайте вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется тепловым излучением?
2. Каков механизм возникновения теплового излучения?
3. Что называется плотностью потока излучения тела?
4. Что такое равновесное излучение?
5. Что называют абсолютно черным телом, серым телом?
6. Как абсолютно черное тело реализуется на практике?
7. Сформулируйте закон Кирхгофа для излучения.
8. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана для излучения.
9. Используя формулу Планка, получите формулу Стефана-Больцмана.
10. Как еще можно измерить температуры лампочки.
11. Как определить значение спектральной излучательной способности тела по графику функции Кирхгофа?
12. Можно ли экспериментально получить график функции Кирхгофа, применяя пирометр данной работы?

13. Как определить значения спектральной поглотительной способности серого и селективного тел?
14. Светящаяся вольфрамовая нить является источником электронов, вылетающих с ее поверхности. Как влияет энергия электронов на точность измерения постоянной Стефана – Больцмана?
15. Предложите способ измерения температуры лазерного излучения.
16. Сделайте выводы о возможных ошибках определения постоянной Стефана – Больцмана и постоянной Планка.
17. Считается, что люминесценция является избытком над тепловым излучением. Поясните это утверждение.
18. Какое излучение называется тепловым?
19. Как соотносится тепловое излучение и, например, тормозное излучение электронов?
20. Каким образом в данной работе учитываются потери энергии?
21. Какова точность определения температуры в данной работе и как ее можно увеличить?
22. Каким образом можно измерить температуру тела в инфракрасной области?
23. Как соотносится равновесное (термодинамическое) излучение и свечение лампы дневного света?
24. Нарисуйте кривую распределения энергии в спектре абсолютно черного тела в зависимости от длины волны для различных температур и укажите на графике, что собой представляет энергетическая светимость.

ГЛОССАРИЙ

Абсолютно черное тело (АЧТ) – тело, у которого при всех длинах волн $A_{\lambda T} = 1$.

Излучение – процесс испускания и распространения энергии в виде волн и частиц.

Интегральная излучательная способность (плотность потока излучения) – поток энергии, испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям в сферическое полупространство; соответствует фотометрическому понятию **энергетической светимости**.

Квазистатический процесс в термодинамике – идеализированный процесс, состоящий из непрерывно следующих друг за другом состояний равновесия. Такие процессы называют

также **квазиравновесными**, так как систему в каждый момент времени можно считать находящейся в состоянии термодинамического равновесия.

Люминесценция (от лат. lumen, род. падеж luminis – свет и – escent – суффикс, означающий слабое действие) – нетепловое свечение вещества, происходящее после поглощения им энергии возбуждения.

Поглощательная способность тела – отношение поглощенной части падающего на тело потока излучения $E_{\text{погл}}$ (превращается в тепло), ко всему падающему потоку $E_{\text{пад}}$.

Равновесное излучение – тепловое излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с веществом. Пример – излучение абсолютно чёрного тела. Спектр не зависит от состава вещества излучающей системы и определяется только температурой, одинаковой для всех частей системы.

Селективное тело – нечерное тело, у которого $A_{\lambda T} < 1$, и оно изменяется в зависимости от длины волны.

Серое тело – нечерное тело, имеющее $A_{\lambda T} < 1$, которое для всех длин волн является одинаковым и зависит только от температуры данного тела.

Спектральная испускательная способность – это мощность, испускаемая телом с единицы площади в единичном интервале частот ($\text{Вт}/\text{см}^2 \cdot \text{Гц}$).

Спектральная поглощательная способность (коэффициент поглощения $A_{\lambda T}$) – характеристика вещества; в общем случае зависит от температуры тела, от длины волны падающего излучения, а также от материала и свойств поверхности поглощающего тела; показывает, какая доля лучистой энергии, падающей за единицу времени на единицу поверхности тела в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, поглощается данной поверхностью.

Тепловое излучение – электромагнитное излучение, возникающее за счёт внутренней энергии тела. Имеет сплошной спектр, расположение и интенсивность максимума которого зависят от температуры тела.

ТермоЭДС – электродвижущая сила U , возникающая в электрической цепи, состоящей из нескольких разнородных проводников, контакты между которыми имеют различные температуры (см. подробнее эффект Зеебека).

Электромагнитные волны – электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью, зависящей от свойств среды. Электромагнитной волной называют распространяющееся электромагнитное поле.

Учебное издание

Изучение явления теплового излучения. Закон Стефана-Больцмана.

Методические указания к выполнению лабораторной работы
3-04 по курсу «Общая физика» для студентов всех направлений и
специальностей

Составители

СЫПЧЕНКО Владимир Сергеевич
ПРЯМУШКО Татьяна Сергеевна
СПИРИДОНОВА Татьяна Игоревна
ЧЖАН Хунжу

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном
соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 10.12.2016. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.
Заказ . Тираж 50 экз.

Национальный исследовательский Томский политехнический
университет

Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована

NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO
9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru