

Государственный комитет СССР по народному образованию.

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана.

И. Н. ФЕТИСОВ, П. В. ГРАМЕНИЦКИЙ

## **ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

Методические указания к лабораторной работе К-2 по курсу общей физики

Под редакцией Л. К. Мартинсона

Москва, 1988

### ВВЕДЕНИЕ

Любое тело с температурой  $T > 0$  К испускает электромагнитное излучение, называемое тепловым (температурным). В энергию излучения превращается внутренняя энергия тела: хаотическое тепловое движение возбуждает атомы и молекулы, которые при переходе в основное энергетическое состояние испускают кванты электромагнитного поля. Из всех излучений только тепловое может находиться в термодинамическом равновесии с веществом. С увеличением температуры мощность излучения резко возрастает, а спектр излучения (сплошной) сдвигается в область коротких волн.

Тепловое излучение имеет место в основном в оптическом диапазоне  $\lambda = 0,01 \dots 1000$  мкм, который подразделяют на три части: видимое излучение (0,4...0,76 мкм), ультрафиолетовое (УФ) - короче 0,4 мкм и инфракрасное (ИК) - длиннее 0,76 мкм. Тела при  $T \approx 300$  К испускают ИК излучение ( $\lambda \approx 3 \dots 50$  мкм), а при  $T > 1000$  К появляется также видимый глазом свет.

Помимо теплового часто встречается другой механизм свечения тел – люминесценция, например испускание света некоторыми веществами (люминофорами) под действием УФ излучения или быстрых электронов. Люминесценция не связана с нагревом тел до высокой температуры, так как излучающие атомы возбуждаются непосредственно УФ излучением или электронным ударом.

Цель работы - изучение законов теплового излучения и методики его измерения.

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Различают интегральные и спектральные энергетические характеристики излучения. Спектральные величины, в отличие от интегральных, рассматривают распределение энергии на различных частотах. Рассмотрим сначала интегральные характеристики оптического излучения.

Поток излучения (мощность)  $\Phi = W/t$  - где  $W$  - энергия излучения за время  $t$ .  $\Phi$  измеряется в ваттах, (Вт).

Излучательность (энергетическая светимость)  $R$  - величина, равная потоку излучения, испускаемого с единицы площади тела по всем направлениям в полусфере  $R = \Phi/S$ , где  $\Phi$  - поток излучения с площади  $S$ .  $R$  измеряется в ваттах на метр в квадрате (Вт/м<sup>2</sup>). Следовательно, поток излучения с площади  $S$  равен

$$\Phi = R S \quad (1)$$

а испущенная за время  $t$  энергия  $W = \Phi t = R S t$ .

Рассмотрим теперь угловую характеристику излучения - зависимость излучения от угла  $\theta$  между направлением света и нормалью  $\vec{n}$  к поверхности (рис. 1а). Пусть с площади  $S$  под углом  $\theta$  испускается в телесном угле  $d\Omega$  поток излучения  $d\Phi$  (рис. 1б). Лучистость (энергетическая яркость) поверхности есть величина

$$B = d\Phi / (S \cos\theta d\Omega) \quad (2)$$

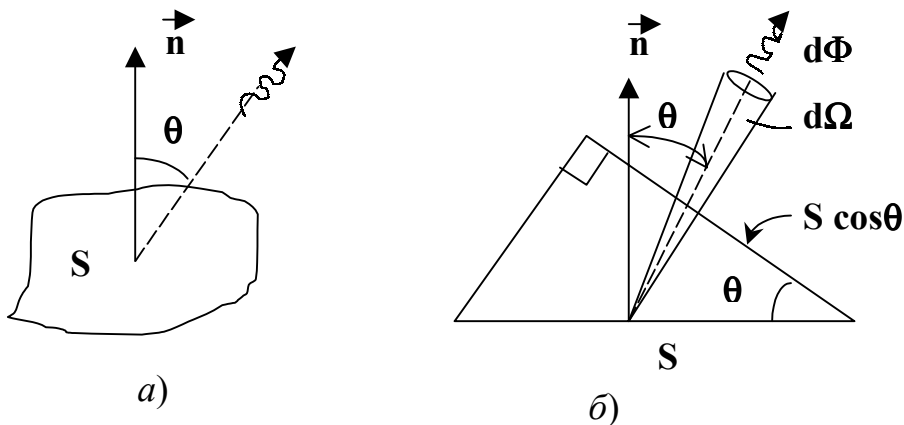


Рис. 1

Из рис. 1б видно, что  $S \cos\theta$  - "кажущаяся площадь" излучателя под углом наблюдения  $\theta$ .  $B$  измеряется в ваттах настерадиан метр в квадрате (Вт/(ср м<sup>2</sup>)).

Распределение энергии излучения по спектру может быть представлено в виде некоторых функций частоты или длины волны излучения (мы будем пользоваться зависимостями от длины волны). Например, если в интервале длин волн  $\lambda, \lambda+d\lambda$  испускается поток  $d\Phi$ , то величина  $\Phi_\lambda = d\Phi/d\lambda$  называется спектральной плотностью потока излучения.  $\Phi_\lambda$  измеряется в ваттах на метр (Вт/м). Она зависит от  $\lambda$  и численно равна мощности в единичном интервале длин волн.

Аналогичная характеристика, но с единицей площади, есть испускательная способность (спектральная плотность излучательности)

$$R_\lambda = \frac{1}{S} \frac{d\Phi}{d\lambda} = \frac{dR}{d\lambda} \quad (3)$$

$R_\lambda$  измеряется в ваттах на метр в кубе (Вт/м<sup>3</sup>).

В интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda+d\lambda$ , поток излучения равен

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda d\lambda$$

полный поток

$$\Phi = \int_0^\infty \Phi_\lambda d\lambda$$

Аналогично соотношение

$$R = \int_0^\infty R_\lambda d\lambda$$

Вернемся к интегральным характеристикам. Для большинства светящихся тел яркость (лучистость) зависит от угла наблюдения:  $B = B(\theta)$ .

Для некоторых тел (молочное стекло и др.) яркость примерно одинаковая в различных направлениях

$$B(\theta) = \text{const} \quad (4)$$

Тогда поток излучения пропорционален косинусу угла  $\theta$ . (см. формулу (2)):

$$d\Phi = BS \cos\theta d\Omega = d\Phi_{\max} \cos\theta \quad (5)$$

где  $d\Phi_{\max} = BSd\Omega$  - поток в направлении нормали.

Зависимость (5), изображенную в полярных координатах (рис. 2), называют законом Ламберта (а соответствующие излучатели - ламбертовскими или косинусными). Этот закон выполняется точно лишь для маленького излучающего отверстия в стенке равномерно раскаленной полости - так называемого «черного тела», играющего важную роль в физике теплового излучения.

Для ламбертовского источника излучательность  $R$  и лучистость  $B$  связаны соотношением

$$R = \pi B \quad (6)$$

которое можно получить интегрированием потока излучения (5) по различным направлениям в полусфере (в пределах телесного угла  $2\pi$  стерadian).

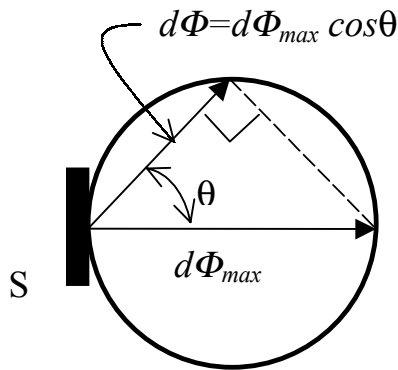


Рис.2

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕЛ.

Падающий на тело поток излучения  $\Phi$  делится на три части - отраженную ( $\Phi_{\text{отр}}$ ), поглощенную ( $\Phi_{\text{погл}}$ ) и пропущенную сквозь тело ( $\Phi_{\text{проп}}$ ):

$$\Phi = \Phi_{\text{отр}} + \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{проп}} \quad (7)$$

Для монохроматического излучения спектральными коэффициентами отражения, поглощения и пропускания называют отношения

$$\rho_{\lambda T} = \Phi_{\text{отр}} / \Phi ; a_{\lambda T} = \Phi_{\text{погл}} / \Phi ; \tau_{\lambda T} = \Phi_{\text{проп}} / \Phi \quad (8)$$

Эти безразмерные коэффициенты, изменяющиеся от 0 до 1, зависят от вещества, состояния поверхности, длины волны, температуры тела. Коэффициент поглощения  $a_{\lambda T}$  - называют также поглощательной способностью тела. Из (7), (8) следует соотношение

$$\rho_{\lambda T} + a_{\lambda T} + \tau_{\lambda T} = 1$$

Тело, поглощающее весь падающий на него поток излучения, независимо от длины волны и температуры, называется абсолютно черным телом (АЧТ). Для него  $a_{\lambda T}^{\text{ЧЕРН}} = 1$ .

Строго говоря, АЧТ - научная абстракция, таких тел нет в природе. Однако в ограниченном спектральном интервале многие тела близки к АЧТ, особенно маленькое отверстие в стенке большой замкнутой полости, стенки которой непрозрачны и имеют одинаковую температуру (рис. 3). Только незначительная часть проникшего в полость излучения выйдет наружу. Отверстие в полости служит экспериментальной моделью АЧТ (для краткости, черное тело) и используется в оптике.

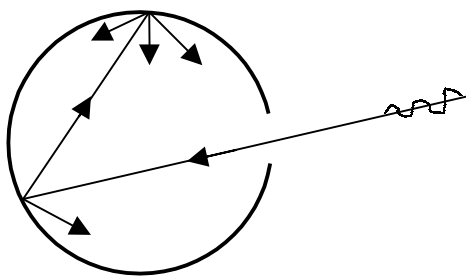


Рис.3

Наряду с понятием АЧТ используют понятие серого тела, поглощательная способность которого меньше единицы, но примерно одинакова для всех длин волн (в некоторой, существенной для данного

рассмотрения области спектра):  $a_{\lambda T}^{\text{сер}} = a_T < 1$ . Для серого тела  $a_T$  зависит от материала, состояния поверхности и температуры.

## ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРНОГО ТЕЛА.

Согласно теоретическому выводу Кирхгофа, испускательная способность абсолютно черного тела зависит только от его температуры и длины волны. Это означает, что излучение из маленького отверстия нагретой полости не зависит от свойств вещества стенок полости. Это обстоятельство - принципиальное и ставит излучение АЧТ в выделенное положение и в теории, и на практике. Излучение АЧТ описывается более простыми и точными законами, чем излучение других тел. Модели АЧТ используются в качестве эталонного источника с известными свойствами.

Закон излучения Планка (основной закон теплового излучений):

испускательная способность АЧТ ( $r_{\lambda T}$ ) зависит от длины волны и температуры следующим образом:

$$r_{\lambda T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT} - 1} \quad (9)$$

где  $c$  - скорость света в пустоте,  $k$  - постоянная Больцмана,  $h$  - постоянная Планка.

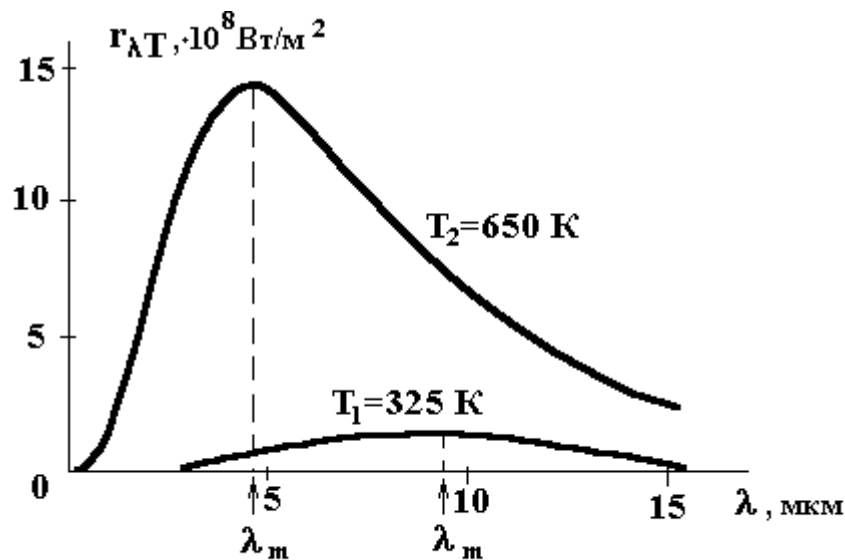


Рис. 4

При выводе (9) Планк выдвинул квантовую гипотезу, согласно которой атомные осцилляторы излучают энергию не непрерывно, а определенными порциями - квантами, причем энергия кванта пропорциональна частоте излучения  $E = h\nu$

Зависимость  $r_{\lambda T}$  от  $\lambda$  при  $T = const$  описывает спектр излучения. На рис. 4 представлены спектры при значениях температуры, характерных для данной лабораторной работы. Мощность излучения с единичной площади в узкой спектральной полосе ширины  $d\lambda$ , т.е. величина  $r_{\lambda T} d\lambda$ , имеет максимум при некотором значении  $\lambda = \lambda_{max}$ , которое уменьшается с увеличением температуры.

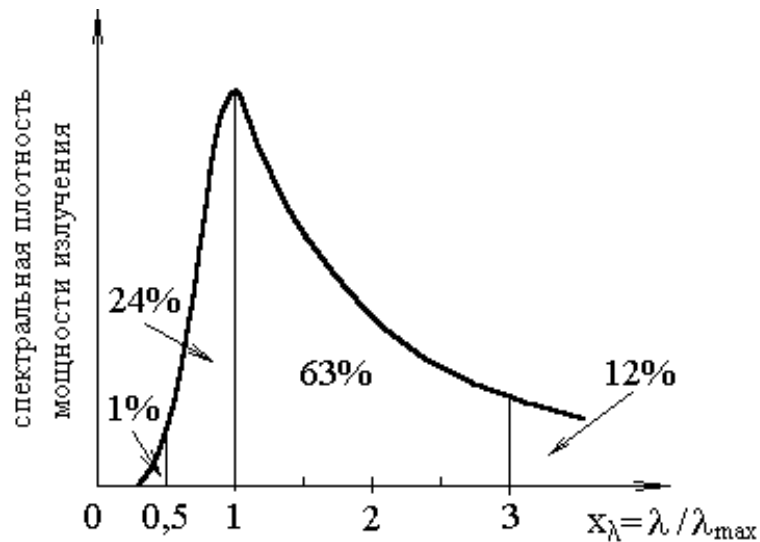


Рис. 5

Хотя спектр изменяется с изменением температуры, он имеет общие закономерности, не зависящие от  $T$ , если выразить волны в безразмерной единице  $x_\lambda = \lambda/\lambda_{\max}$ . Тогда доля излучаемой энергии в различных участках не зависит от температуры (доля в % от полной энергии приведена на рис. 5). Полезно запомнить, что примерно 90% энергии приходится на спектральный интервал  $x_\lambda = 0,5 \dots 3,0$ , т.е. от  $\lambda_{\max}/2$  до  $3\lambda_{\max}$ .

Формула (9) и закон Ламберта (5) полностью описывают излучение АЧТ. Из (9) можно получить ряд полезных следствий, например закон Стефана-Больцмана и закон смещения Вина (открыты ранее закона излучения Планка).

Закон смещения Вина. Длина волны  $\lambda_{\max}$ , соответствующая максимальной спектральной плотности излучательности АЧТ, обратно пропорциональна температуре:

$$\lambda_{\max} = C/T \quad (10)$$

где  $C$  - постоянная.

Формулу (10) и значение  $C = hc/(4,965K) = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{м}$  можно получить, если продифференцировать функцию (9) по  $\lambda$  и приравнять производную нулю:

$$dr_{\lambda T}/d\lambda = 0$$

Закон Стефана-Больцмана. Излучательность АЧТ, т.е. полная мощность излучения с единичной площади, пропорциональна четвертой степени температуры

$$R_\Sigma = \int_0^\infty r_{\lambda T} d\lambda = \sigma T^4 \quad (11)$$

где  $\sigma = (2\pi^5 k^4)/(15c^2 h^3)$  есть постоянная Стефана-Больцмана (одна из фундаментальных физических постоянных).

Значения  $\lambda_{\max}$  и  $R_\Sigma$  (округленные) для различной температуры АЧТ приведены в табл. 1.

Таблица 1

$T, \text{К}$	$\lambda_{\max}, \text{мкм}$	$R_\Sigma, \text{Вт/м}^2$	Примеры
3	1000	$5 \cdot 10^{-6}$	Жидкий гелий, реликтовое излучение Вселенной
$3 \cdot 10^2$	10	$5 \cdot 10^2$	Тела при комнатной температуре
$3 \cdot 10^3$	1	$5 \cdot 10^6$	Тепловые источники света

$3 \cdot 10^5$	0,01	$5 \cdot 10^{14}$	Огненный шар на определенной стадии ядерного взрыва
----------------	------	-------------------	---

## ИЗЛУЧЕНИЕ РЕАЛЬНЫХ ТЕЛ. ЗАКОН КИРХГОФА

Излучение реальных тел отличается от излучения АЧТ по мощности, спектру и угловому распределению.

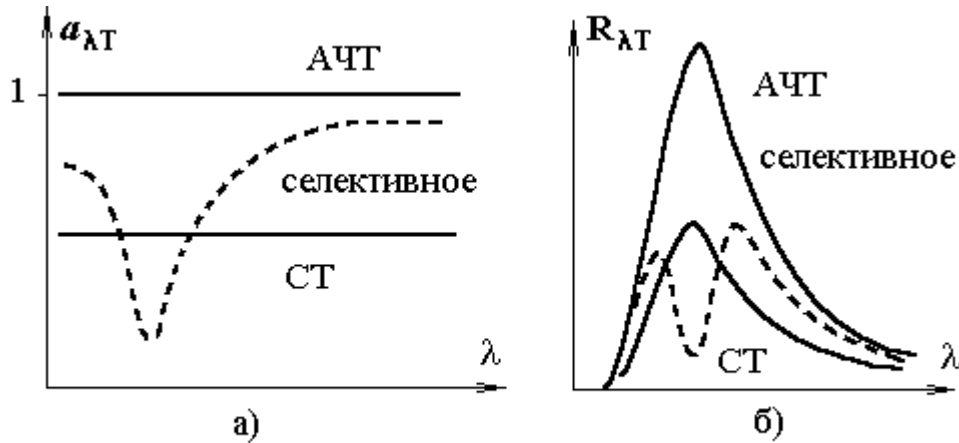


Рис.6

Закон Кирхгофа (рис. 6). Для всех тел отношение испускательной способности  $R_{\lambda T}$  к поглощательной способности  $a_{\lambda T}$  равно испускательной способности  $r_{\lambda T}$  абсолютно черного тела при той же температуре и длине волны, причем  $r_{\lambda T}$  (см. формулу (9)) является универсальной функцией  $\lambda$  и  $T$

$$R_{\lambda T}/a_{\lambda T} = r_{\lambda T} \quad (12)$$

Из формулы (12) следует, что излучение реальных тел  $R_{\lambda T} = a_{\lambda T} r_{\lambda T}$  меньше, чем АЧТ при одинаковых  $\lambda$  и  $T$ , так как  $a_{\lambda T} < 1$ . Если тело плохо поглощает излучение (хорошо отражает или прозрачно), то оно будет слабо светиться на этих же длинах волн.

На рис. 6а представлены спектры поглощения абсолютно черного тела, серого тела (СТ) и тела с селективным (избирательным) поглощением, т.е. зависящим от  $\lambda$ . Спектры теплового излучения этих тел при одинаковой температуре изображены на рис. 6б. На всех длинах волн излучение серого тела составляет постоянную долю  $a_T < 1$  от излучения АЧТ, т.е. серый спектр подобен черному. Для тела с селективным поглощением спектр излучения может быть совсем иным.

Излучательность  $R_{\lambda T}^{cep}$  серого тела, согласно закону Кирхгофа, равна  $R_{\lambda T}^{cep} = a_T r_{\lambda T}$ , а полная мощность с единичной площади

$$R^{cep} = \int_0^{\infty} R_{\lambda T}^{cep} d\lambda = a_T \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda = a_T R_{\Sigma}$$

или с учетом (11)

$$R^{cep} = a_T \sigma T^4 \quad (13)$$

Таким образом, закон Стефана-Больцмана (11) можно приближенно применять к серым телам, введя поправочный множитель  $a_T$ . Коэффициент поглощения  $a_T$  в (13) называют также коэффициентом излучения серого тела (или коэффициентом черноты).

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе изучаются законы Кирхгофа и Стефана-Больцмана, находится значение  $\sigma$ , измеряется прозрачность ряда материалов для ИК (инфракрасного) излучения.

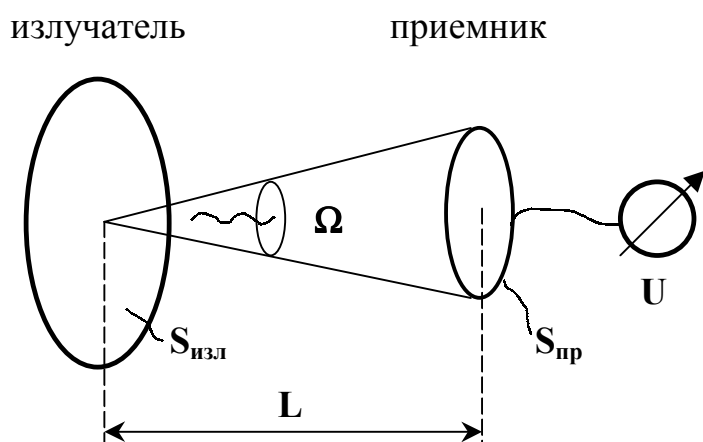


Рис. 7

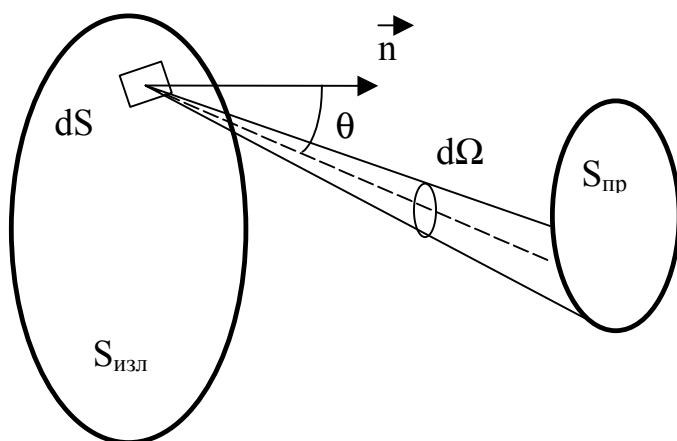


Рис. 8

Для черного тела запишем (см. формулы (1), (11))  $\Phi_{\text{полн}} = S_{\text{изл}} \sigma T^4$  или. Чтобы найти  $\sigma$ , надо для черного тела площади  $S_{\text{изл}}$  измерить температуру  $T$  и полный поток излучения  $\Phi_{\text{полн}}$  (по всем направлениям и частотам), причем в определенных (абсолютных) единицах-ваттах. Такого рода измерения относятся к абсолютным измерениям и представляют определенную сложность.

Для черного тела полный поток излучения в полусферу  $\Phi_{\text{полн}}$  можно найти, если измерить поток  $\Phi$  в небольшом телесном угле  $\Omega$  и воспользоваться законом Ламберта, т.е. известной зависимостью излучения от угла (см. формулу (5) и рис. 2).

Принципиальная схема измерений дана на рис. 7. Излучатель площади  $S_{\text{изл}}$ , имеющий лучистость (энергетическую яркость)  $B$  и излучательность  $R$ , дает полный поток излучения по всем направлениям (см. формулы (1),(6))

$$\Phi_{\text{полн}} = S_{\text{изл}} R = \pi S_{\text{изл}} B \quad (14)$$

Излучение измеряется приемником с площадью приемного элемента  $S_{\text{пр}}$ . Поток излучения с поверхности  $dS$ , в телесном угле  $d\Omega$ , под углом  $\theta$  (рис.8) равен (см. формулу (5))

$$d\Phi = B \cos\theta dS d\Omega.$$

Поток излучения  $\Phi$  в телесном угле  $\Omega$  падающий на приемник, равен

$$d\Phi = B \int_{S_{\text{изл}}} \int_R \cos\theta dS d\Omega \quad (15)$$

где интегрирование производится по площади излучателя  $S_{\text{изл}}$  и по всем углам в направлении приемника. Интеграл находится просто для случая, когда линейные размеры излучателя и приемника малы по сравнению с расстоянием  $L$  между ними. Тогда угол  $\theta$  мал ( $\cos\theta \approx 1$ ), телесный угол равен  $\Omega = S_{\text{пр}}/L^2$  и из (15) получим:

$$\Phi_{\text{полн}} = S_{\text{изл}} \Omega B = (S_{\text{изл}} S_{\text{пр}} / L^2) B \quad (16)$$

Напомним, что телесный угол с вершиной в центре сферы равен отношению площади, вырезаемой образующими угла на поверхности сферы, к квадрату радиуса сферы.

Исключая  $B$  из (14) и (16), получим искомое соотношение между потоками:

$$\Phi_{\text{полн}} = (\pi L^2 / S_{\text{пр}}) \Phi \quad (17)$$

По закону Стефана-Больцмана для серого тела (15)

$$\Phi_{\text{полн}} = S_{\text{изл}} R^{\text{сер}} = S_{\text{изл}} a_T \sigma T^4 \quad (18)$$

Исключим  $\Phi_{\text{полн}}$  из (17) и (18), тогда

$$\Phi = (S_{\text{пр}} / \pi L^2) S_{\text{изл}} a_T \sigma T^4 \quad (19)$$

$S_{\text{изл}} a_T \sigma T^4$  - полная мощность излучения с площади  $S_{\text{изл}}$ , серого тела при температуре  $T$ , а множитель  $(S_{\text{пр}} / \pi L^2)$  - это доля излучения, попадающего в приемник.

В данной работе температура излучателя изменяется от комнатной (примерно 22°C или  $T_0 = 295$  К) до  $T \approx 700$  К (и выше в некоторых конструкциях излучателя). При комнатной температуре  $T_0$  на приемник со стороны излучателя падает поток (19)

$$\Phi_0 = S_{\text{пр}} S_{\text{изл}} a_T \sigma T_0^4 / (\pi L^2) \quad (19a)$$

Следовательно, при возрастании температуры от  $T_0$  до  $T$  поток излучения возрастает на величину

$$\Delta\Phi = \Phi - \Phi_0 = S_{\text{пр}} S_{\text{изл}} a_T \sigma (T^4 - T_0^4) / (\pi L^2) \quad (20)$$

Выражение (20) - главное для экспериментальной части работы.

Принимаемое излучение приемник преобразует в выходное напряжение  $U$ , которое пропорционально приращению потока (при малых  $\Delta\Phi$ ):

$$U = \Pi \Delta\Phi = \Pi (\Phi - \Phi_0) \quad (21)$$

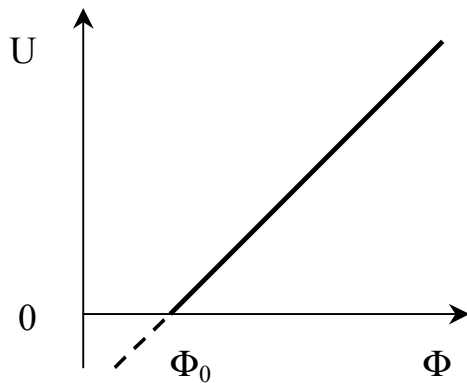


Рис.9

Коэффициент преобразования (чувствительность)  $\Pi$  можно измерять с помощью калибровки. Зависимость (21) изображена на рис. 9. То обстоятельство, что "отклик" приемника  $U$  пропорционален  $\Delta\Phi$ , а не самому потоку  $\Phi$ , обусловлено принципом действия приемника (см. ниже).

Другое важное свойство приемника - примерно одинаковая чувствительность к излучению различной частоты, испускаемому нагретыми телами. Тепловой спектр широкий (по крайней мере от  $0,5\lambda_{\text{max}}$  до  $3\lambda_{\text{max}}$ ), и все его составляющие должны преобразовываться в выходной сигнал с одинаковым значением  $\Pi$ .

Примечание: вычислите интервал  $(0,5 \dots 3)\lambda_{\text{max}}$  для  $T=350$  К и 700 К, чтобы оценить требуемый рабочий диапазон приемника.

Изучение закона Стефана-Больцмана и определение постоянной  $\sigma$

В этом опыте используется излучатель типа черное тело, для которого измеряется зависимость  $\Delta\Phi = U/\Pi$  от температуры  $T$  и строится графическая зависимость  $\Delta\Phi$  от  $(T^4 - T_0^4)$ . Если, в согласии с (20), полученная зависимость - прямая, проходящая через начало координат, то мощность теплового излучения АЧТ пропорциональна  $T^4$ .

Из наклона полученной прямой (отношение  $\Delta\Phi / (T^4 - T_0^4)$ ), принимая приближенно  $a_T = 1$ , можно найти постоянную Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{\pi L^2}{S_{\text{изл}} S_{\text{пр}}} \frac{\Delta\Phi}{T^4 - T_0^4} \quad (22)$$

Геометрические параметры ( $L$ ,  $S_{\text{изл}}$ ,  $S_{\text{пр}}$ ) приведены в паспорте установки.

#### Изучение закона Кирхгофа

В этом опыте используется другой излучатель, имеющий две различные рабочие поверхности - из полированного металла с небольшим коэффициентом поглощения  $a_{\text{мет}}$ , и черную - с



$a_{\text{черн}} > a_{\text{мет}}$ . Обе поверхности, нагретые примерно до одинаковой температуры, поочередно обращают к приемнику и измеряют  $\Delta\Phi_{\text{черн}} = U_{\text{черн}}/\Pi$  и  $\Delta\Phi_{\text{мет}} = U_{\text{мет}}/\Pi$ .

Согласно закону Кирхгофа, сильнее должна излучать черная сторона  $\Delta\Phi_{\text{черн}} > \Delta\Phi_{\text{мет}}$ , так как  $a_{\text{черн}} > a_{\text{мет}}$ .

Запишем формулу (20) для двух излучателей, отличающихся только поглощательной способностью (для  $a_{\text{T}} = a_{\text{черн}}$  и  $a_{\text{T}} = a_{\text{мет}}$ ), затем, разделив одно выражение на другое, получим:

$$a_{\text{черн}}/a_{\text{мет}} = \Delta\Phi_{\text{черн}}/\Delta\Phi_{\text{мет}} = U_{\text{черн}}/U_{\text{мет}} \quad (23)$$

Численные значения  $a_{\text{черн}}$  и  $a_{\text{мет}}$  не известны, но из результатов опыта и формулы (23) можно найти их отношение.

Изучение прозрачности материалов для ИК излучения

При распространении излучения в среде оно селективно (избирательно) поглощается на собственных частотах вещества, связанных со структурой энергетических уровней атомов, молекул и кристаллической решетки. Поэтому исследования спектральных коэффициентов пропускания  $\tau_{\lambda\text{T}}$  (или поглощения  $a_{\lambda\text{T}}$ ) имеют большое значение как для науки, так и для практической деятельности.

Коэффициент  $\tau_{\lambda\text{T}}$  сложным образом зависит от  $\lambda$ . Одни вещества могут быть прозрачны для видимого света, но непрозрачны для инфракрасного излучения, другие - наоборот.

В данной работе, используя немонахроматическое ИК излучение горячего черного тела, можно оценить усредненный по спектру (примерно от  $0,5\lambda_{\text{max}}$  до  $3\lambda_{\text{max}}$ ) коэффициент пропускания фильтров из различных материалов (пластмассы, стекло)

$$\tau = \Delta\Phi_{\text{ф}}/\Delta\Phi = U_{\text{ф}}/U \quad (24)$$

где  $U$  и  $U_{\text{ф}}$  - выходной сигнал приемника без фильтра и с фильтром. Фильтр помещается между излучателем и приемником.

## ПРИЕМНИК ИЗЛУЧЕНИЯ

Приемники оптического излучения подразделяют на фотоэлектрические и тепловые. В первых используется явление фотоэффекта (внешнего или внутреннего) - передача энергии отдельного фотона электрону, приводящая к регистрируемым изменениям в электрической цепи приемника. Чувствительность фотоэлектрических приемников (весьма высокая) сильно зависит от  $\lambda$  и равна нулю при длине волны больше, чем «красная граница» фотоэффекта. По этой причине приемники на фотоэффекте не подходят для целей данной работы и больше рассматриваться не будут.

В тепловых приемниках (ТП) поглощенная лучистая энергия непосредственно преобразуется в тепловую, вызывая повышение температуры термочувствительного элемента. В теплоту можно

превратить излучение любой частоты, поэтому чувствительность тепловых приемников в принципе может не зависеть от частоты. Другое достоинство ТП - их легко прокалибровать в единицах лучистого потока (ватт). На простейшей схеме поясним принцип действия ТП и опишем рабочий вариант.

Лампа накаливания облучает металлическую

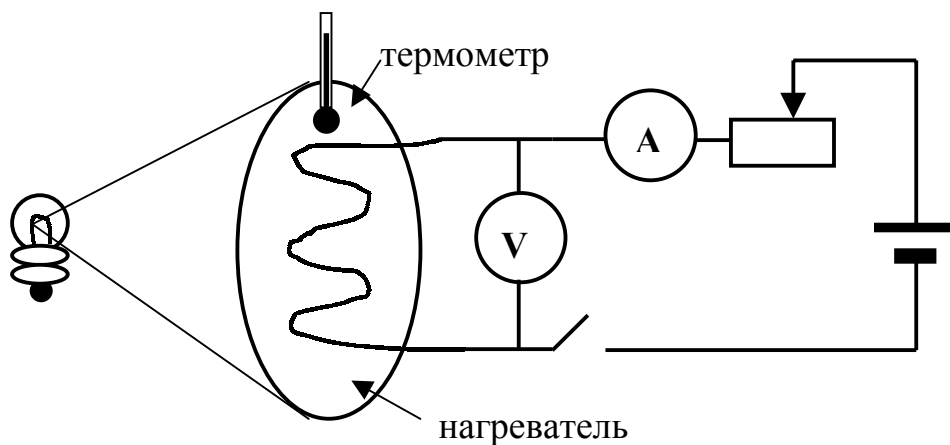


Рис. 10

пластинку (рис. 10). Пластика покрыта сажей для того, чтобы излучение различной частоты поглощалось практически полностью. В пластинку встроены термометр и электрический нагреватель. Через некоторое время пластинка нагреется и установится равновесное состояние, т.е. в каждый отрезок времени за счет излучения к пластине подводится столько же энергии, сколько ее теряется. Затем прекратим доступ излучению и установим такой ток в нагревателе, чтобы температура сохранялась прежней. Для этого потребуется определенная мощность (мощность электрического замещения  $P_{зам}$ ), равная мощности излучения, поглотившегося в первой части опыта. Измеритель мощности излучения, таким образом, калиброван.

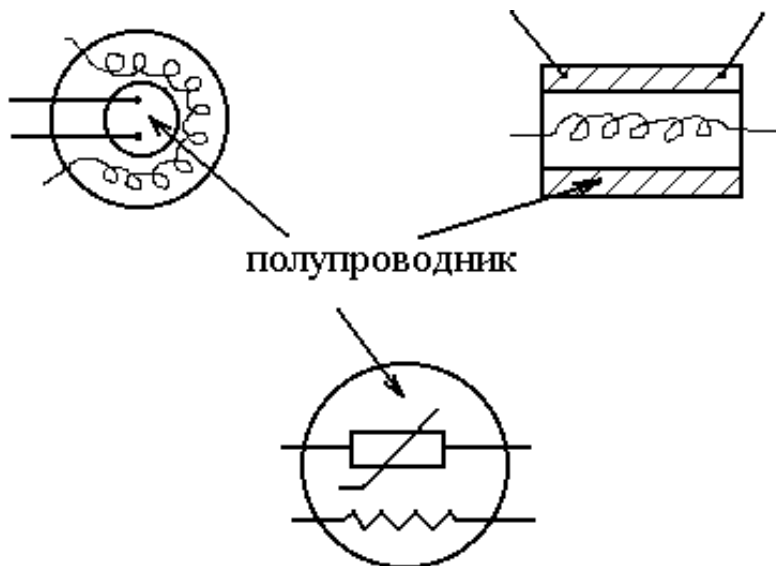


Рис. 11

В данной работе используется тепловой приемник болометрического типа. Действие болометра основано на изменении электрического сопротивления термочувствительного элемента («термометра») при нагревании его вследствие поглощения измеряемого потока излучения.

Конструкция используемых нами болометров показана на рис. 11а.

Болометр изготовлен из полупроводника в виде миниатюрной бусинки или трубочки, покрытой черным лаком. Нихромовая спираль служит для калибровки. Условное изображение болометра показано на рис. 11б.

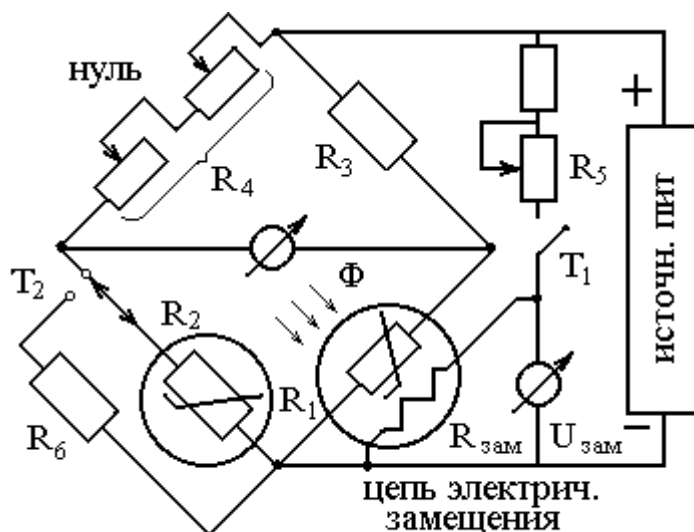


Рис. 12

Небольшое изменение сопротивления болометра (поскольку его нагрев слабый) удобно зарегистрировать мостовой схемой. Электрическая схема приемника показана на рис. 12. Два болометра с сопротивлением  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_1 \approx R_2$ ) и резисторы  $R_3$ ,  $R_4$  образуют плечи моста. В одну диагональ моста включен источник постоянного напряжения, в другую - чувствительный вольтметр для измерения выходного сигнала приемника  $U$ . Измеряемое излучение падает только на болометр  $R_1$  (измерительный), а второй болометр служит для компенсации изменений температуры воздуха.

Перед измерением устанавливается нуль приемника  $U=0$  с помощью переменных резисторов ( $R_4$ ), при этом выполняется условие баланса моста:

$$R_1/R_3 = R_2/R_4 \quad (25)$$

Нуль устанавливается при комнатной температуре черного тела  $T_0 \approx 295$  К, когда оно испускает поток излучения  $\Phi_0$  (см. формулу (19a)). Также нуль можно установить, перекрыв затвором излучение горячего тела.

При нагревания излучателя лоток  $\Phi$  возрастает, болометр нагревается, сопротивление  $R_1$ , изменяется, условие баланса (25) нарушается и в диагонали моста появляется напряжение (см. формулу (21))

$$U = \Pi (\Phi - \Phi_0) = \Pi \Delta\Phi$$

Калибровка - нахождение коэффициента пропорциональности  $\Pi$ . Излучение перекрывается затвором, включается тумблер  $T_1$  (рис. 12), с помощью переменного резистора  $R_5$  изменяется напряжение электрического замещения  $U_{\text{зам}}$  на нагревателе сопротивления  $R_{\text{зам}}$  и снимается зависимость  $U$  от  $U_{\text{зам}}$ . По результатам измерений строится график  $U$  от  $P_{\text{зам}}$  - мощности электрического замещения (джоулево тепло):

$$P_{\text{зам}} = U_{\text{зам}}^2 / R_{\text{зам}} \quad (26)$$

Из построенного графика видно, что  $U$  пропорционально  $P_{\text{зам}}$

$$U = \Pi P_{\text{зам}} \quad (27)$$

В хорошо сконструированном болометре значение  $\Pi$  одно и то же в (21) и (27), т.е. "отклик" приемника  $U$  одинаковый на одинаковое радиационное и калибровочное действие ( $\Delta\Phi = P_{\text{зам}}$ ).

Из наклона прямой на калибровочном графике можно найти  $\Pi$  (см. формулу (27)).

Термокомпенсация. Чтобы понять необходимость введения в схему (рис. 12) компенсационного болометра ( $R_2$ ), надо иметь в виду, что излучением болометр нагревается всего на десятые доли градуса. Поэтому, в отсутствие второго болометра, изменение температуры воздуха в течение опыта сильно искажало бы результаты измерения лучистого потока.

Эту помеху можно значительно уменьшить (компенсировать) вторым болометром, который находится рядом с измерительным болометром, но не освещается исследуемым излучением. Действительно, на изменение температуры воздуха оба болометра будут реагировать одинаковым изменением сопротивления (на одинаковый множитель), поэтому баланс моста (25) нарушаться не будет. Компенсация будет тем лучше, чем меньше различаются болометры.

Компенсационный болометр можно отключить тумблером  $T_2$  (заменив его обычным резистором  $R_6$ ), чтобы сравнить стабильность приемника в двух режимах.

## ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

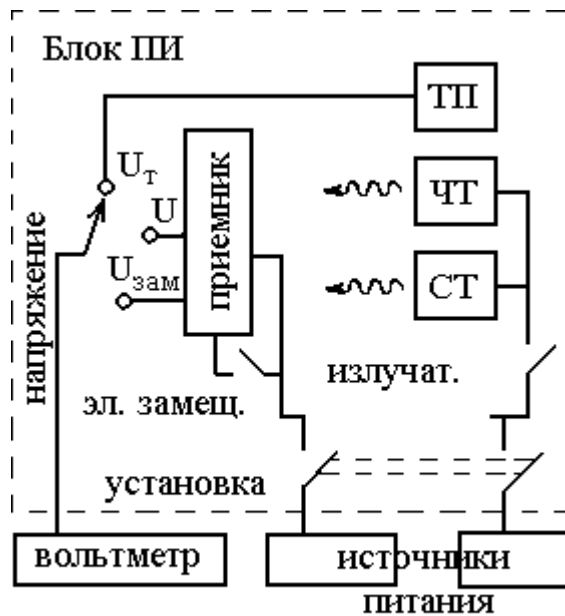


Рис. 13

Установка, структурная схема которой показана на рис.13, включает в себя блок приемника и излучателей (ПИ), вольтметр и источники питания приемника и излучателей. К установке прилагается набор различных фильтров для измерения их прозрачности в инфракрасных лучах.

Блок ПИ содержит: тепловой приемник, описанный ранее; источники теплового излучения - типа серое тело (СТ) для изучения закона Кирхгофа и типа черное тело (ЧТ) для изучения закона Стефана-Больцмана и прозрачности фильтров. Термопара (ТП) предназначена для измерения температуры черного тела.

Блок ПИ показан на рис. 14 в разрезе по горизонтали. Излучатель ЧТ представляет собой металлический сердечник 1, нагреваемый нихромовой спиралью 2.

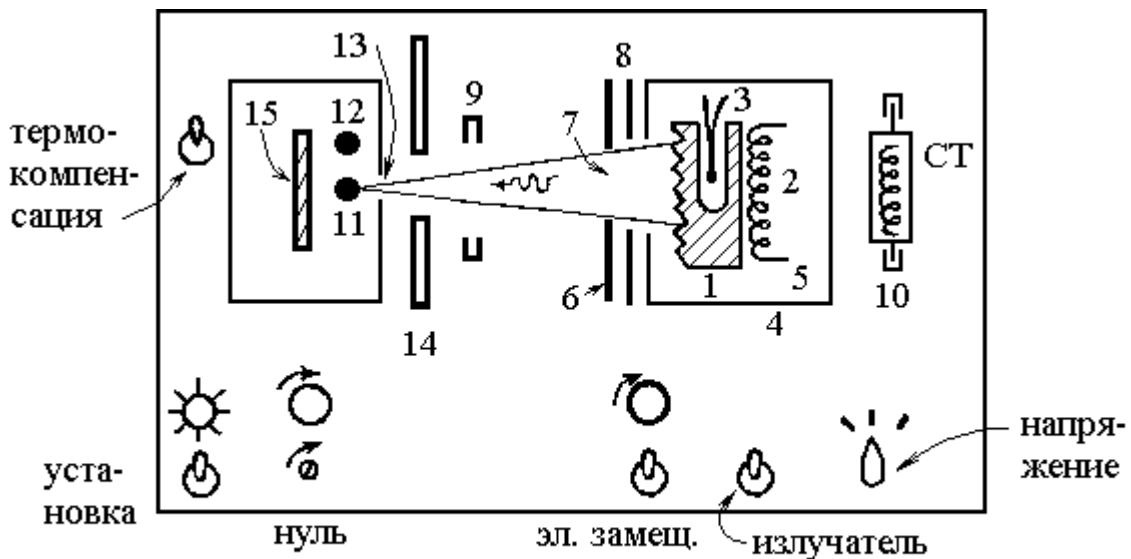


Рис. 14

Термопара 3 (или ртутный термометр) вставлена внутрь сердечника. Излучающая поверхность имеет канавки треугольной формы и зачернена, чтобы ее коэффициент излучения был близок к единице ( $a_T \approx 1$ ). Сердечник находится в корпусе 4, заполненном теплоизолятором 5. Диафраг-

ма 6 с круглым отверстием 7 площади  $S_{\text{изл}}$  задает рабочий размер излучателя. Пластина 8 с отверстием предохраняет диафрагму 6 от нагревания (тепловой экран).

Излучатель СТ, изготовленный из медной трубки с нагревательной спиралью внутри, имеет две плоские поверхности различной степени «черноты». Излучатель может занимать два положения - рабочее 9 и нерабочее 10.

Измерительный 11 и компенсационный 12 болометры находятся в приемной камере с небольшим входным отверстием 13, которое можно закрывать затвором 14. Излучение, прошедшее мимо болометра 11, поглощается зачерненной пластиной 15 и не отражается обратно.

На блоке ПИ имеются органы управления (рис. 13, 14): тумблеры УСТАНОВКА (питание блока), ТЕРМОКОМПЕНСАЦИЯ ( $T_2$  на рис.12), ИЗЛУЧАТЕЛЬ (включение электронагревателей) и ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗАМЕЩЕНИЕ (тумблером - включение, а ручкой - регулировка напряжения замещения  $U_{\text{зам}}$ ). С помощью переключателя НАПРЯЖЕНИЕ вольтметр присоединяется к различным участкам электрической схемы для измерения,  $U$ ,  $U_{\text{зам}}$  и  $U_T$  (термопара). Все эти напряжения, составляющие единицы - десятки милливольт, необходимо измерять с погрешностью не более  $\approx 0,1$  мВ.

Приемник питается стабилизированным напряжением, от величины которого зависит чувствительность  $P$ , поэтому в ходе опыта напряжение не следует менять. Электронагреватели ЧТ и СТ питаются от другого источника, напряжение которого можно изменять для изменения температуры и скорости нагрева.

Приемник имеет некоторую тепловую инерционность и не мгновенно реагирует на внешние воздействия (тепловое излучение или ток замещения). Тепловая инерция излучателя ЧТ существенно больше и изменения его температуры происходят медленно.

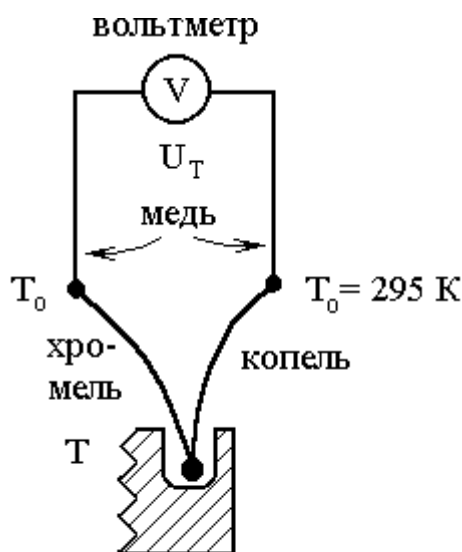


Рис. 15

Термопара (термоэлемент) - это датчик температуры, основанный на явлении Зеебека: в замкнутой цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми имеют различную температуру, возникает термоэдс и электрический ток.

Для термопар подбирают такие пары проводников, чтобы иметь побольше термоэдс и устойчивость при высоких температурах (железо, никель, различные сплавы - константан, нихром, хромель, копель и др.).

На рис. 15 показана схема измерения температуры черного тела. Спай хромель - копель имеет измеряемую температуру  $T$ , а спаи хромель - медь и копель - медь имеют комнатную температуру  $T_0 \approx 295 \text{ K}$  (медные провода соединяют термопару с вольтметром).

При малых  $T - T_0 (\leq 100 \text{ K})$  напряжение термопары  $U_T$  прямо пропорционально разности температур спаев:

$$U_T = \alpha(T - T_0)$$

Коэффициент пропорциональности зависит от материала проводников ( $\alpha \approx 20 - 70 \text{ мкВ/К}$ ). При больших  $T - T_0$  необходимо учитывать более сложную (нелинейную) связь между напряжением и температурой. Зависимость  $T$  от  $U_T$ , приложена к установке.

### ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Задание 1. Ознакомление с установкой.

1. Ознакомиться с инструкцией. Записать параметры установки (данного экземпляра).
2. Если в направляющие 9 (рис. 14) вставлен фильтр (или СТ), убрать его.
3. Выключить тумблеры ИЗЛУЧАТЕЛЬ, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗАМЕЩЕНИЕ, включить - ТЕРМОКОМПЕНСАЦИЯ.
4. Проверить, подключены ли источники питания и вольтметр в соответствии с инструкцией.
5. Включить СЕТЬ вольтметра и источников питания. Установить рабочие напряжения. Включить тумблер УСТАНОВКА.
6. Установить нуль приемника: закрыть затвор 14 (рис. 14), переключателем НАПРЯЖЕНИЕ подключить к вольтметру выход приемника и медленно поворачивая ручку НУЛЬ ПРИЕМНИКА (точно) установить  $U=0$  (при необходимости использовать грубую регулировку).

Необходимо проверять и подстраивать нуль через 5...15 минут.

Задание 2. Изучение закона Стефана – Больцмана.

Постепенно нагревая излучатель ЧТ, снять зависимость напряжения приемника  $U$  от температуры  $T$  (напряжение термопары  $U_T$ ). Отсчеты производить через  $\Delta T \approx 50 \dots 70 \text{ K}$  ( $\Delta U_T \approx 3 \dots 4 \text{ мВ}$ ). Результаты измерений записать в таблицу 2.

Таблица 2.

ИЗМЕРЕНИЯ		ОБРАБОТКА		
$\Delta U_T$	$U$	$T, \text{K}$	$T^4 - T_0^4, \text{K}^4$	$\Delta \Phi = U/\Pi, \text{Вт}$

Скоростью нагрева можно управлять напряжением на спирали. Отсчеты следует производить, когда  $U$  и  $U_T$  будут изменяться медленно. Поэтому, если нагрев слишком быстрый, перед отсчетом следует уменьшить напряжение.

Установив максимальное допустимое напряжение на спирали, произвести измерения при высокой температуре. Когда рост температуры замедлится, следует, не выключая излучателей и не уменьшая напряжения, перейти к следующему заданию.

Задание 3. Изучение закона Кирхгофа

Установить нуль приемника. Излучатель СТ вставить в направление 9 (рис. 14) перед приемником. Измерить  $U$  в двух положениях СТ. результаты записать в таблицу 3.

Таблица 3.

Поверхность	$U, \text{В}$	$a_{\text{черн}}/a_{\text{мет}}$
Металлическая Черная		

Вычислить отношение коэффициентов поглощения (см. формулу(23)).

Задание 4. Измерение коэффициента пропускания фильтров.

Убрать СТ в нерабочее положение 10. Установить нуль. Измерить  $U$  без фильтра и с фильтром, вставленным перед приемником. Результаты занести в таблицу 4.

Таблица 4.

Фильтр	Толщина	U	$\tau$
1. Без фильтра	-		-
2. ....			
.....			

Вычислить  $\tau$  (см. формулу (24)). Повторить измерения с другими фильтрами.

Измерить температуру ЧТ и по закону смещения Вина рассчитать рабочий интервал длин волн при исследовании фильтров. Результаты записать в таблицу 5.

Таблица 5.

$U_T$	T	$\lambda_{max}$	$(0,5 - 3) \lambda_{max}$

Примечание: измерив U и  $U_T$ , дополните таблицу 2 результатом при большой температуре.

Задание 5. Калибровка приемника.

Выключить излучатель, закрыть затвор, установить нуль.

Включить тумблер ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И снять зависимость U от  $U_{зам}$  (пока U не достигнет максимального значения в предыдущих опытах). Результаты занести в таблицу 6.

Таблица 6.

U	$U_{зам}$	$P_{зам}$ , (расчет по формуле(26))
$P =$		

Задание 6. Исследование стабильности приемника

Цель - оценить преимущества приемника с компенсационным болометром по сравнению с приемником без него.

Задание выполнять одновременно с обработкой результатов.

Опыт заключается в сравнении временной стабильности нулевого уровня приемника в двух режимах - с термокомпенсацией и без нее.

Выключить тумблер ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗАМЕЩЕНИЕ, закрыть затвор, установить нуль и в течение 5...10 минут следить за "уходом" нуля. Запишите максимальный "уход" нуля.

Выключить тумблер ТЕРМОКОМПЕНСАЦИЯ, установить нуль и повторить измерения. Сравните максимальный уход нуля в двух режимах и сделайте вывод.

**Внимание!!!** По окончании работы выключить тумблеры УСТАНОВКА, СЕТЬ. Закрыть затвор, убрать фильтры в коробку. Тумблер ТЕРМОКОМПЕНСАЦИЯ включить.

### ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Построить калибровочный график и определить чувствительность приемника  $P$  (см. «калибровка» в разделе «Приемники излучения»).

2. Вычислить T (по формуле в инструкции),  $T^4 - T_0^4$  (где  $T_0 = 295 \text{ K}$ ) и  $\Delta\Phi$  от  $T^4 - T_0^4$  (см. табл.2). Построить графическую зависимость  $\Delta\Phi$  от  $T^4 - T_0^4$ . Сделать вывод, выполняется ли в опыте закон Стефана -Больцмана. Определить постоянную  $\sigma$  (см. раздел «Изучение закона Стефана-Больцмана и определение постоянной  $\sigma$ »)

3. Оценить погрешности измерения постоянной  $\sigma$ . Завышает или занижает  $\sigma$  предположение, что поглощающая способность излучателя и приемника равна 1? Укажите другие систематические погрешности.

Пользуясь методическими указаниями к лабораторной работе М-1 «обработка результатов измерений при проведении физического эксперимента» (раздел «Погрешности косвенных измерений»), оценить случайную погрешность  $\Delta\sigma$ , приняв относительные погрешности измерений площади приемника - 4%, площади излучателя - 1%,  $\Delta L/L = 2\%$ ,  $\Delta T/T = 1\%$ , потока излучения ( $\Delta\Phi$ ) - . Погрешностью для  $T_0$  пренебречь.

Результат представить в форме  $\sigma \pm \Delta\sigma$ , указать единицу измерения, сравнить с табличным значением и сделать вывод о результатах нахождения  $\sigma$ .

### ОТЧЕТ

Отчет должен содержать конспект теоретической части, схемы установки (рис. 7, 12), таблицы 2...6 экспериментальных данных и два графика.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое излучательность, лучистость? Как связаны они для АЧТ?
2. Сформулируйте законы теплового излучения?
3. Объясните методику изучения закона Стефана – Больцмана?
4. Объясните принцип действия болометра?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В.. Курс общей физики, т.3.- М.: Наука, 1979.
2. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Сов. радио, 1978 - 400 с.