

## Лабораторная работа № 1

# ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ФОТОМЕТРИИ

**Цель работы:** изучение основных законов фотометрии и методики сравнения силы света различных источников.

### Теоретическая часть

#### 2.19. Энергетические и световые фотометрические величины

Раздел оптики, в котором рассматривается измерение энергии, переносимой электромагнитными волнами оптического диапазона, называется *фотометрией*. Для определения энергии в фотометрии используются 2 метода: *объективный* и *визуальный, или субъективный*. В первом случае величина энергии измеряется на основании воздействия электромагнитной волны на фотоприемник, причем сигнал, вырабатываемый фотоприемником, является зависимым от энергии или интенсивности электромагнитной волны. При использовании визуального метода величины, характеризующие энергию волны, оцениваются по зрительному восприятию человека. В зависимости от метода измерения используются два типа фотометрических величин: *энергетические* и *световые*.

Тела, излучающие свет называются *источниками света*. Источники света в зависимости от размеров делятся на *точечные* и *протяженные*. Точечные источники – источники, размеры которых много меньше расстояния до освещаемой поверхности. Источники, размеры которых не удовлетворяют этому требованию, называется протяженным.

#### Энергетические фотометрические величины

Основной энергетической величиной в фотометрии является *энергетический поток излучения*. Энергетический поток излучения  $\Phi_e$  (поток излучения) характеризует среднюю мощность излучения, которая переносится электромагнитной волной через некоторую поверхность  $\sigma$ :

$$\Phi_e = \langle P \rangle = \int_{\sigma} \langle S \rangle d\sigma, \quad (1.1)$$

где  $\langle P \rangle$  – среднее значение мощности.

*Энергетическая освещенность*  $E_e$  – отношение потока излучения, который падает на площадку, к величине ее площади:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{\sigma}. \quad (1.2)$$

Если падающий поток распределен на площадке неравномерно, то равенство (1.2) определяет среднюю освещенность. Под освещенностью в окрестности некоторой точки следует понимать величину

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{d\sigma}, \quad (1.3)$$

где  $d\sigma$  – некоторая элементарная площадка, в пределах которой световой поток можно считать постоянным.

Величина  $H_e = E_e t$  называется *энергетической экспозицией*. Она характеризует интегральный эффект, производимый электромагнитной волной на фотоприемник.

Для характеристики точечных источников излучения используют величину, которую называют *энергетической силой излучения*  $J_e$  и которая равна отношению величины потока излучения, излучаемого внутрь *телесного угла*  $d\Omega$ , к величине этого угла (рис. 1.1):

$$J_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} . \quad (1.4)$$

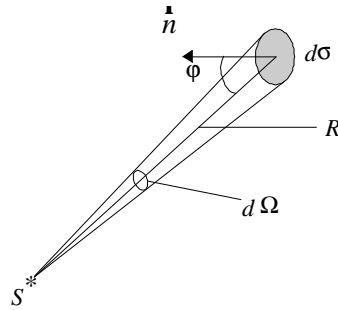


Рис. 1.1. Определение телесного угла, опирающегося на произвольно ориентированную площадку

Мерой телесного угла является отношение площади  $\sigma_0$  участка, вырезаемого на поверхности сферы конусом с вершиной в ее центре, к квадрату ее радиуса (рис. 1.2):

$$\Omega = \frac{\sigma_0}{R^2} .$$

Телесный угол, опирающийся на произвольно ориентированную площадку  $d\sigma$ , определяется выражением:

$$d\Omega = \frac{d\sigma \cos \varphi}{R^2} , \quad (1.5)$$

где  $R$  – расстояние от точки наблюдения до площадки  $d\sigma$ ,  $\varphi$  – угол между нормалью к площадке и направлением на источник (см. рис. 1.1).

Источники, у которых сила излучения одинакова по всем направлениям, называются *изотропными*. Для таких источников

$$J_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} .$$

Поскольку полный телесный угол равен  $4\pi$ , то световой поток, излучаемый изотропным источником по всем направлениям, будет равен

$$(\Phi_e)_{\text{полн}} = 4\pi J_e .$$

Используя формулы (1.3 – 1.5), можно записать

$$E_e = \frac{J_e d\Omega}{d\sigma} = \frac{J_e \cos \varphi}{R^2} , \quad (1.6)$$

где  $R$  – расстояние от источника до площадки  $d\sigma$  (рис. 1.1).

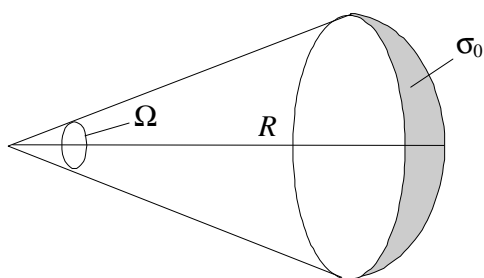


Рис. 1.2. К определению телесного угла, опирающегося на сферический сегмент

Таким образом, освещенность, создаваемая точечным источником, прямо пропорциональна косинусу угла между направлением падающих лучей и нормалью к освещаемой поверхности и обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника. Вторая часть данного утверждения выражает известный в фотометрии закон обратных квадратов.

Для характеристики протяженных источников используют понятия энергетической яркости и светимости. *Энергетическая яркость* – это отношение потока, который излучается единичной видимой поверхностью источника  $\sigma' \cos \varphi'$  в телесный угол  $d\Omega$ , к величине этого угла (рис. 1.3):

$$L_e(\varphi') = \frac{d\Phi_e}{\sigma' \cos \varphi' d\Omega}. \quad (1.7)$$

Яркость можно определить также как силу света, создаваемую единичной видимой площадью источника:

$$L_e(\varphi') = \frac{J_e}{\sigma' \cos \varphi'}. \quad (1.8)$$

Источники, яркость которых не зависит от направления излучения, т.е.  $L_e(\varphi') = L_e$ , называют *ламбертовыми*. Для ламбертовых источников

$$J_e = J_0 \cos \varphi', \quad (1.9)$$

где  $J_0 = L_e \sigma'$  – сила излучения, создаваемая источником в направлении  $\varphi' = 0^\circ$ .

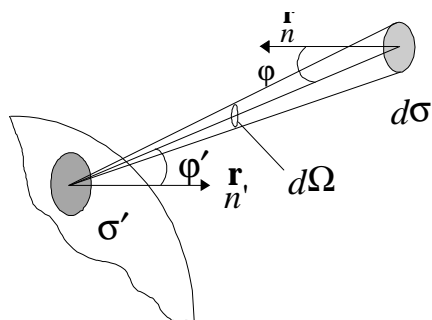


Рис. 1.3. К определению яркости протяженного источника

Равенство (1.9) выражает известный в фотометрии закон *И.Ламберта*.

*Энергетическая светимость*  $M_e$  равна отношению полного энергетического потока, испускаемого протяженным источником по всем направлениям, к величине его площади, т.е.

$$M_e = \frac{\Phi_e}{\sigma'}. \quad (1.10)$$

Используя выражение (1.8), можно записать

$$M_e = \int L_e(\phi') \cos \phi' d\Omega .$$

Для ламбертовых источников

$$M_e = \pi L_e . \quad (1.11)$$

На практике в фотометрии используемые источники не являются монохроматическими. В этом случае используют спектральные плотности соответствующих величин. Спектральной плотностью любой энергетической величины, является отношение среднего значения этой величины в рассматриваемом малом спектральном интервале к ширине этого интервала  $d\lambda$ . Например, *спектральная плотность энергетической светимости* будет определяться соотношением

$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda} .$$

Полная энергетическая светимость в некотором спектральном диапазоне может быть определена интегрированием:

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda ,$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – границы рассматриваемого спектрального интервала.

## СВЕТОВЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Для практических целей часто важно не только тепловое действие электромагнитных волн, но и вызываемые ими зрительные ощущения. Как известно, зрительные ощущения вызывает электромагнитное излучение с длиной волны 380 – 760 нм, которое обычно называют *светом*. Для количественной характеристики интенсивности используют световые или фотометрические величины. В этом случае измерения осуществляют путем визуального сравнения (уравнивания) яркостей или освещенностей двух фотометрических полей: эталонного и исследуемого. Таким образом, для световых измерений необходимо использовать эталонный источник света. Наиболее удобным является *эталон силы света* в виде нагретых до высокой температуры твердых тел. В качестве эталона служит абсолютно черный излучатель<sup>11</sup>, который находится при температуре плавления платины ( $T = 2045$  К). Он состоит из закрытой снизу керамической трубки диаметром около 2 мм и длиной 40 мм (рис. 2.29). Трубка помещена в тигель для расплава, заполненный чистой платиной. Для термоизоляции тигель помещен в сосуд с порошком тория. Платина расплавляется переменным индукционным током, величина которого в обмотке подбирается такой, чтобы поддерживать платину при температуре кристаллизации, т.е. 2045 К.

---

<sup>11</sup> Примером абсолютно черных излучателей могут быть сажа, поверхность Солнца.

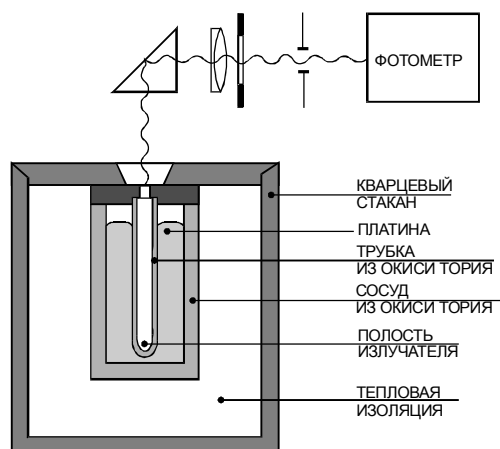


Рис. 1.4. Эталон силы света

Трубка и тигель сверху закрыты крышкой с отверстием, через которое выходит излучение. Это излучение направляется на поверхность фотометра. Сила света исследуемого источника определяется путем сравнения освещенностей поверхности данным источником и эталонным.

Единицей *силы света* служит *кандела* (от лат. *candela* – свеча). Кандела равна силе света в данном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частоты  $540 \cdot 10^{12}$  Гц ( $\lambda = 555$  нм), энергетическая сила светового излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср. Сила света в одну канделу создается поверхностью площадью  $1/600\,000$  м<sup>2</sup> ( $1/60$  см<sup>2</sup>) черного излучателя в перпендикулярном направлении при температуре затвердевания платины и давлении, равном 101 325 Па. Кандела относится к числу основных физических величин. На ее основе определяются другие световые величины.

*Световой поток* равен силе света, испускаемого источником в телесный угол  $d\Omega$ :

$$d\Phi = J d\Omega.$$

За единицу светового потока в системе СИ принимается *люмен* (лм). Он равен световому потоку, излучаемому изотропным источником в одну канделу внутри телесного угла в один стерadian:

$$1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} 1 \text{ ср}.$$

Остальные световые величины – *освещенность*, *яркость* и другие – определяются аналогично энергетическим величинам. Отметим, что в данном случае используется световой поток, оцениваемый по зрительному ощущению «среднего» глаза.

Для измерения освещенности используется единица *люкс* (лк); люкс равен освещенности поверхности площадью в 1 м<sup>2</sup> при световом потоке падающего на него излучения, равном 1 лм:

$$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм} / 1 \text{ м}^2.$$

Единицей измерения яркости является кандела на 1 м<sup>2</sup> (кд/м<sup>2</sup>).

Излучение одной и той же мощности в различных интервалах длин волн вызывает различные зрительные ощущения яркости источника. Наиболее ярким представляется излучение на длине волны 555 нм (зеленая область видимого спектра). Характеристикой, определяющей чувствительность «среднего» глаза человека для монохроматического излучения различных длин волн, является *спектральная световая*

*эффективность*. Она равна отношению светового потока  $\Phi_\lambda$  к потоку энергии излучения  $\Phi_{e\lambda}$ , создающего этот световой поток, т.е.

$$V_\lambda = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi_{e\lambda}} .$$

Световая эффективность принимает максимальное значение для длины волны 555 нм. Отношение спектральной световой эффективности  $V_\lambda$  при данной длине волны к ее максимальному значению ( $V_{555}$ ) называют *относительной спектральной световой эффективностью*:

$$K_\lambda = \frac{V_\lambda}{V_{555}} .$$

Спектральная зависимость  $K_\lambda$ , называемая *кривой видности*, приведена на рис. 2.30.

При малых яркостях наблюдаемых предметов (сумеречное зрение) максимум относительной спектральной световой эффективности смещается в сторону коротких длин волн (*эффект Е.Пуркинье*).

Если известна спектральная плотность энергетического потока излучения источника  $\Phi_{e\lambda}$ , причем  $\Phi_{e\lambda} = d\Phi_e/d\lambda$ , то спектральную плотность соответствующего светового потока можно определить из соотношения:

$$\Phi_\lambda = V_{555} K_\lambda \Phi_{e\lambda} . \quad (1.12)$$

Полный световой поток определяется интегрированием выражения

$$\Phi = V_{555} \int K_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda . \quad (1.13)$$

Формулы (1.12) и (2.13) определяют связь энергетических и световых величин. Величина  $V_{555}$  называется *световым эквивалентом излучения*, она принимается равной 683 лм/Вт, т.е. энергетический поток в 1Вт вызывает зрительное ощущение, соответствующее 683 лм. Величину  $M_{555} = 1/V_{555}$  называют *энергетическим механическим эквивалентом света*

$$M_{555} = 1,46 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/лм}.$$

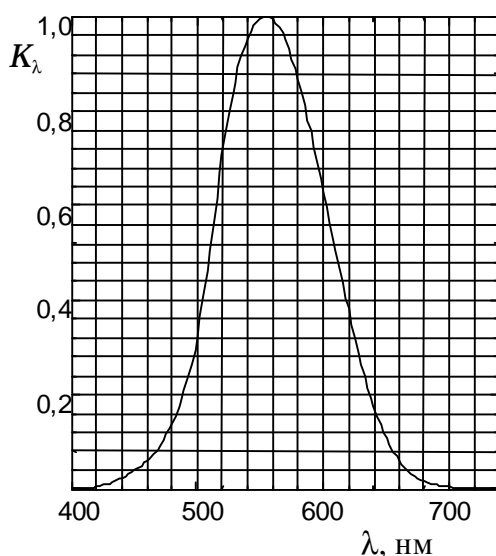


Рис. 1.5. Кривая видности

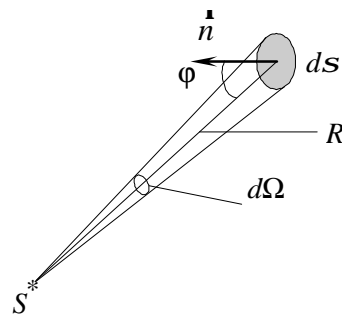
Таким образом, основной характеристикой источника света является величина, называемая силой света. Измерение силы света можно произвести путем измерения количества световой энергии (абсолютный метод). Такой метод измерения иногда может представлять некоторые трудности. Поэтому часто измерение силы света какого-либо источника производят путем сравнения этого источника света с другим источником, сила света которого заранее измерена каким-либо абсолютным методом.

Для достижения фотометрического равновесия при сравнении силы света источников, как и при других световых измерениях на скамье, измеряется расстояние между источниками и приемной пластиной фотометрической головки или любого установленного на скамье фотометра. Если полагать, что обе стороны приемной пластины расположены симметрично и имеют одинаковый коэффициент отражения, то при световом равновесии будут равны освещенности обеих сторон пластины. Зная расстояния от приемной пластины до освещающих ее источников света, можно сравнить силу света этих источников. Если сила света одного из них известна, то определится и сила света второго источника.

### Первый закон освещенности

Освещенность, создаваемая точечным источником, обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до освещаемой поверхности, при условии, что угол между нормалью  $\vec{n}$  к освещаемой поверхности и осью конуса не изменяется (рис. 1):

$$E \propto \frac{1}{R^2} \quad (1)$$



**Рис. 1.** Определение освещенности, создаваемой точечным источником

### Второй закон освещенности

Освещенность, создаваемая точечным источником, прямо пропорциональна косинусу угла, составляемого направлением светового потока (осью узкого конуса, внутри которого распространяется поток) с нормалью к освещаемой поверхности (рис. 1):

$$E = E_0 \cos \varphi, \quad (2)$$

где  $E_0$  - освещенность, создаваемая источником при нормальном падении на нее света.

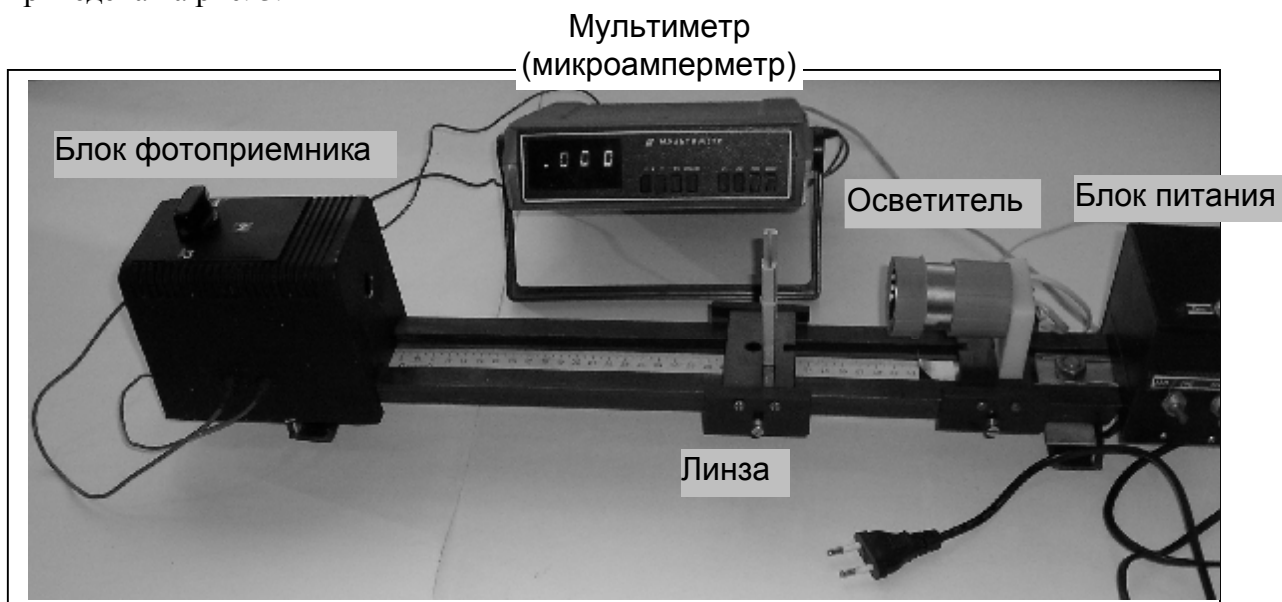
Эти два закона выражаются одной формулой

$$E = \frac{J \cos \varphi}{R^2}, \quad (3)$$

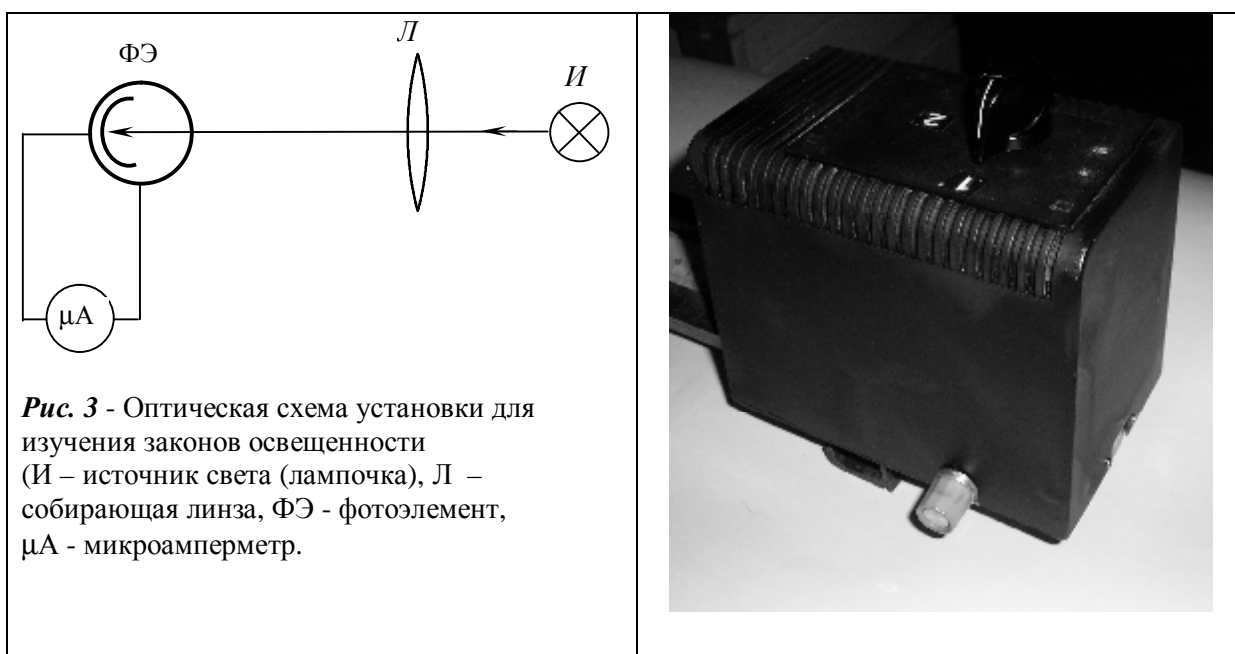
Из 1-3 следует что  $E_0 = \frac{J}{R^2}$

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

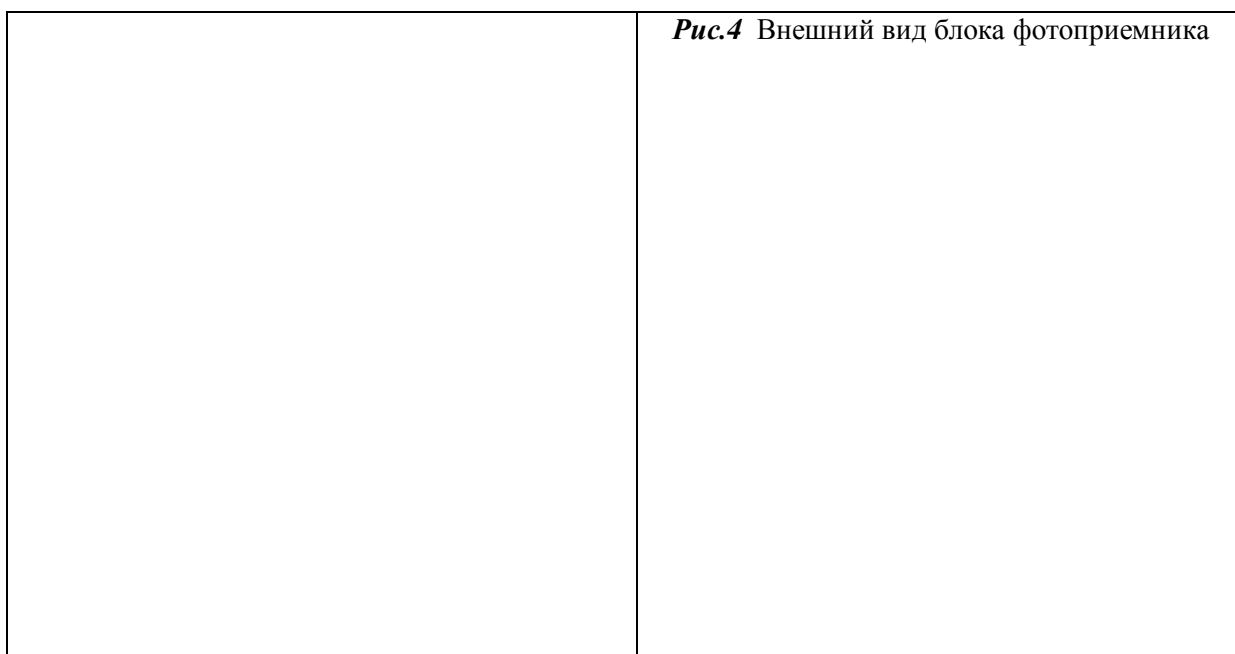
Лабораторная установка состоит из осветителя, блока фотоприемника, собирающей линзы, закрепленной на подвижном рейтере, источника питания и цифрового мультиметра. Внешний вид установки показан на рис. 2. Оптическая схема приведена на рис. 3.



*Рис. 2. Внешний вид установки*







**Рис.4** Внешний вид блока фотоприемника

В осветителе в качестве источника света используется лампа накаливания 12 В, 21 Вт, питаемая от источника постоянного тока блока питания. Включение и выключение лампы накаливания осуществляется тумблером «**сеть**», установленным на верхней части корпуса блока питания. Для изменения напряжения питания лампы на передней части корпуса блока питания установлен тумблер, имеющий два положения. В положении «**12 В**» на лампу подается напряжение 12 В; в положении «**10 В**» - 10 В.

Блок фотоприемника (рис. 4) содержит полупроводниковый фотоэлемент - фотодиод ФД21-К, платформу с диафрагмами. Все указанные элементы помещены в светонепроницаемый корпус. При освещении фотодиода в цепи создается электрический ток (фототок), сила которого прямо пропорционально величине падающего на его поверхность светового потока. Для измерений величины фототока используется мультиметр, работающий в режиме измерения силы тока.

Перед приемником на специальной платформе установлены 4 диафрагмы (1-4), различного диаметра. Это позволяет изменять величину светового потока, падающего на фотоприемник. Диафрагмы могут поворачиваться вокруг вертикальной оси независимо от фотоприемника, при этом имеется четыре фиксированных положения, при которых устанавливаются диафрагмы различного диаметра. Для установки диафрагмы определенного диаметра используется переключатель, установленный на верхней части корпуса фотоприемника. Размеры диафрагм приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Размеры диафрагм фотоприемника

Номер диафрагмы	Диаметр, мм	Площадь, мм <sup>2</sup>
1.	8,5	66,8
2.	7,1	40
3.	5,0	20
4.	3,6	10

Фотоприемник с помощью ручки «**поворот фотоэлемента**», установленной с левой стороны корпуса фотоприемника, может поворачиваться на определенный угол. При этом угол падения света на фотоприемник (угол  $\varphi$ ) может изменяться от 0 до 90° относительно оптической оси, проходящей через центр нити лампы накаливания и середину фотодиода. Для изменения угла используется шкала с надписью «**j , угл. град**» расположенная на задней части фотоприемника

Осветитель, блок фотоприемника, собирающая линза и источник питания на оптическом рельсе длиной 50 см. Блок фотоприемника и источник питания закреплены на концах рельса неподвижно. Осветитель (и источник света) а также линза установлены на подвижных рейтерах, что позволяет перемещать их относительно фотоприемника.

## ИНФОРМАЦИЯ ПО БЕЗОПАСНОСТИ

При работе на данной установке следует иметь в виду, что лампа накаливания нагревается до температуры более 60 °С. Касание металлической части осветителя может привести к ожогу кожи. Перемещение осветителя следует осуществлять за рейтер, расположенный в его нижней части непосредственно на рельсе. После выполнения измерений осветитель необходимо немедленно выключать.

### **Упражнение 1. Изучить зависимость светового потока от площади освещаемой поверхности.**

1. Собрать оптическую схему в соответствии с рис. 2 и 3.
2. Установить фотоэлемент в положение 0°.
3. Включить лампочку на 12 и установить ее на расстоянии примерно 20-25 см от фотоэлемента.
4. Установить линзу между фотоэлементом и лампочкой. Передвигая линзу, добиться, чтобы была освещена вся поверхность фотоэлемента (в этом случае свет на фотоэлемент падает параллельным пучком, так как лампочка будет расположена в фокусе линзы).
5. Установить на фотоэлемент диафрагму 1, прикрытую матовым стеклом.
6. Измерить величину фототока с помощью микроамперметра.
7. Устанавливая поочередно диафрагмы 1-4, измерить величину фототока для каждой диафрагмы.
8. Результаты измерений записать в таблицу 2.
9. Построить график зависимости фототока от освещаемой площади  $i=i(S)$ , откладывая по оси абсцисс значение площади  $S$ , а по оси ординат значение силы тока  $i$ .

Таблица 2

№ опыта	Величина освещаемой площади $S$ (см <sup>2</sup> )	Величина фототока $i$ (μA)

**Упражнение 2. Проверка первого закона освещенности**

1. Установить диафрагму 1.

Снять с рельса линзу, используемую в первом упражнении.

2. Измерить величину фототока изменяя расстояние от источника света до фотоэлемента в пределах от 40 до 15 см. Измерения проделать для 5-7 значений  $r$ .

3. Результаты измерений записать в таблицу 3.

4. Построить графики зависимостей  $i=i(1/r^2)$ . (Силу тока  $i$  откладывать по оси ординат).

5. Показать, что  $E \propto \frac{1}{R^2}$ .

6. Сделать вывод о соответствии вида графика первому закону освещенности.

Таблица 3

№ опыта	Расстояние от источника до фотоэлемента $r$ (см)	$1/R^2$	Величина фототока $i(mA)$
1.			
2.			

**Упражнение 3. Проверка второго закона освещенности**

1. Установить фотоэлемент в вертикальное положение  $\varphi=0^\circ$ .

2. Между фотоэлементом и источником света поставить линзу и, передвигая ее добиться полной освещенности поверхности фотоэлемента (то можно определить по максимальному фототоку).

3. Измерить величину фототока при падении лучей света на фотоэлемент под различными углами от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Измерения провести для 8 различных углов  $\varphi$ .

**Лампочку и линзу при этом не двигать не следует!**

4. Результаты измерений записать в таблицу 4.

5. Построить графики экспериментальной и теоретической  $i_{теор}=i_0 \cos\varphi$  зависимостей  $i_{эксп}=i(\cos\varphi)$ ,  $i_{теор}=(\cos\varphi)$ ,  $i=f(\varphi)$ . (По оси ординат откладывать значение тока  $i$ ).

6. Сравнить графики теоретической и экспериментальной зависимостей и сделать вывод о соответствии вида графиков второму закону освещенности.

Таблица 4.

№ опыта	Угол падения лучей $\varphi$	$i_0$ , (мкА)	Величина фототока эксперим. $i_{экспер}(мкА)$	Величина фототока теоретич. $i_{теор}=i_0\cos\varphi$

**Упражнение 4. Сравнение силы света двух различных источников.**

Используя законы освещенности, можно определить силу света одного из источников света, если сила света другого источника известна. Для этого проводят нижеописанные опыты, добиваясь равенства освещенности поверхности фотоэлемента от этих источников.

1. Установить лампочку на расстоянии  $R_1=10$  см от фотоэлемента.

2. Фотоэлемент установить в вертикальное положение ( $\varphi=0^\circ$ ).

3. Подключить лампочку к напряжению 12 В.
4. Измерить величину фототока с помощью микроамперметра.
5. Переключить лампочку на 10 В.
6. Перемещая лампочку вдоль оси прибора, добиться, чтобы показание микроамперметра было равно тому, что и при напряжении 12В. Фиксируют расстояние  $R_2$  от источника до фотометра.
7. По формуле  $\frac{J}{J_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2}$  найти отношение силы света источников.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие два типа фотометрических величин вы знаете?
2. Назовите энергетические фотометрические величины.
3. Как определяются световые фотометрические величины?
4. Какими величинами характеризуются протяженные источники света?
5. Как осуществляется переход от энергетических величин к световым?
6. Определите световую эффективность  $\eta$  (в ваттах на люмен) используемой вами эталонной лампы (21 В, 21 кд), учитывая, что она потребляет мощность 100 Вт.
7. Какой физический смысл имеет механический эквивалент света?
8. Почему видимый диапазон электромагнитных волн является наиболее подходящим для зрения? Почему максимум кривой видности приходится на 555 нм (зеленый свет)?
9. Почему световая эффективность используемых ламп накаливания является очень низкой (не более 2%)? Как можно ее повысить?
10. Почему при выполнении упражнения 1, мы можем судить о световом потоке, измеряя силу электрического тока?
11. Сформулировать законы освещенности и уметь объяснить, как проверяли их выполнение в данной лабораторной работе?
12. Уметь объяснять ход графиков, полученных в упражнениях лабораторной работы.
13. Как используется закон обратных квадратов при измерении силы света, одного из источников (в упражнении 4)?
14. **Расчетное задание.** Высота Солнца над горизонтом  $60^\circ$ . Сравнить освещенности вертикальной стены и земной поверхности.

### **ЛИТЕРАТУРА**

#### *Основная*

1. Маскевич А.А. Физический практикум по оптике: Учеб. Пособие / Гродно: ГрГУ, 2001. – 251 с.
2. Маскевич А.А. Оптика: Учеб. Пособие / Гродно: ГрГУ, 2010. – 562 с.
1. Матвеев А.Н. Оптика. Учеб. пособие для физ. спец. вузов.- М.: Высш. шк., 1985.-351 с.
3. Бутиков Е.И. Оптика. Учеб. пособие для вузов/ Под ред. Н.И. Калитиевского, М. :Высш. шк., 1986.-512 с.
4. Саржевский А.М. Оптика. В 2-х т. Учеб. пособие для физ. спец. ун-тов.-Мн.: Из-во “Университетское”, 1984.- Т. 1-2.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. -Учеб. пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985.- 751.с.

#### *Дополнительная*

1. Лансберг Г.С. Оптика. -Учеб. пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976.- 926 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Пер. с англ. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973.- 719 с.