

Лабораторная работа

ОСНОВЫ ФОТОМЕТРИИ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Воздействие света на глаз или какой-либо другой приемный аппарат состоит прежде всего в передаче этому регистрирующему аппарату энергии, переносимой световой волной. Поэтому, необходимо составить себе представление об измерениях энергетических параметров света. *Фотометрия* - раздел физической оптики, в котором рассматриваются энергетические характеристики оптического излучения в процессах его испускания, распространения и взаимодействия с веществом. Прежде всего, необходимо дать определения тем величинам, которые применяют в измерительной практике. Их выбор обусловлен особенностями приемных аппаратов, непосредственно реагирующих на ту или иную из этих величин. При формулировке теоретических законов или практических выводов в разнообразных областях (теория излучения, светотехника, оплотехника, физиологическая оптика и т.д.) оказывается нередко удобным пользоваться то одним, то другим из введенных величин.

Этим объясняется многообразие фотометрических понятий. Перейдем к их рассмотрению.

1. **Поток световой энергии Φ .** Представим себе источник света настолько малых размеров, что на некотором расстоянии от него можно считать фронт распространяющейся волны сферическим. Такой источник называется *точечным*.

Расположим на пути светового потока, идущего от источника S (рис.1), какую-нибудь малую площадку σ произвольной ориентации и измерим количество энергии dQ , протекающее через эту площадку за время t . Отношение

$$\frac{dQ}{t} = d\Phi, \quad (1)$$

показывающее количество световой энергии, протекающей через площадку σ за единицу времени (*мощность* сквозь поверхность σ), называется *поток световой энергии через поверхность σ* .

Так как световая энергия в однородной среде распространяется прямолинейно, то, проведя из точки S совокупность лучей, опирающихся на контур площадки σ , мы получим конус, ограничивающий поток, протекающий через σ . Если внутри среды поглощением энергии можно пренебречь, то через любое сечение этого конуса протекает один и тот же поток. Сечение конуса сферической поверхностью с центром в S и с радиусом, равным единице, дает меру телесного угла конуса $d\Omega$. Если нормаль \vec{N} к поверхности σ составляет угол i с осью конуса, а расстояние от S до площадки есть R , то

$$d\Omega = \frac{\sigma \cos i}{R^2}. \quad (2)$$

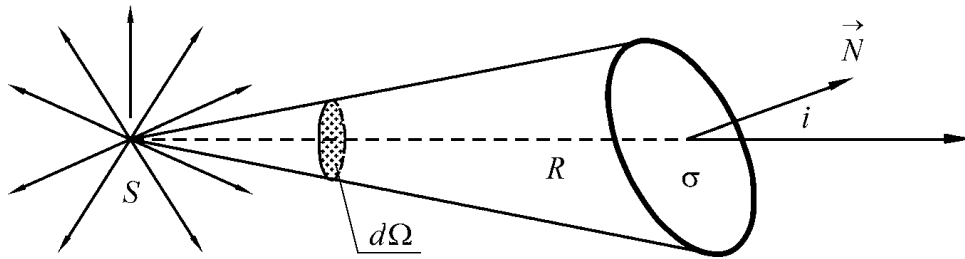


Рис.1. К определению понятия “поток световой энергии”

Таким образом, выделенная часть потока приходится на телесный угол $d\Omega$. При этом предполагается, что линейные размеры площадки σ малы по сравнению с R , так что $d\Omega$ небольшая величина и внутри $d\Omega$ поток можно считать равномерным. Полный поток идущий от S по всем направлениям, будет

$$\Phi = \int d\Phi. \quad (3)$$

причем интеграл берется по полному телесному углу 4π .

2. Сила света - световой поток в единице телесного угла с центром на поверхности источника излучения.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (4)$$

Если поток Φ посылается источником равномерно по всем направлениям, то

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}$$

есть сила света, одинаковая для любого направления. В случае неравномерного потока величина $\Phi/4\pi$ представляет лишь среднюю силу света и называется **средней сферической силой света**.

3. Для количественной оценки освещаемой поверхности введено понятие **освещенности** - величины потока, приходящейся на единицу поверхности. Освещенность площадки σ (обозначения те же, что на рис.3) есть

$$E = \frac{d\Phi}{\sigma} = \frac{I d\Omega}{\sigma} = \frac{I \cos i}{R^2}. \quad (5)$$

4. Яркость источника. На практике, часто расстояние между источником света и наблюдателем таково, что глаз может различить форму источника. По отношению к таким источникам, составляющих громадное большинство, имеет смысл ввести понятие **поверхностной яркости** (или просто **яркости**).

Поверхностная яркость B есть величина, характеризующая излучение светящейся поверхности по данному направлению, определяемого углом i с нормалью к рассматриваемому элементу светящейся поверхности.

Выделим пучок, опирающийся на элемент поверхности σ и образующий телесный угол $d\Omega$; ось пучка составляет угол i с нормалью \vec{N} к поверхности σ (рис.2). Видимая поверхность элемента в направлении оси есть $\sigma \cos i$. Пусть поток, посылаемой ею в телесный угол $d\Omega$, равен $d\Phi$. Очевидно, он пропорционален **видимой** поверхности излучателя $\sigma \cos i$ и величине телесного угла $d\Omega$. Коэффициент пропорциональности зависит

от свойств излучающей поверхности и может быть различным для различных направлений углов i относительно нормали. Обозначив этот коэффициент через B_i получим

$$B_i = \frac{d\Phi}{dS \cos i d\Omega}. \quad (6)$$

Коэффициент B_i носит название **яркости** источника по направлению, определяемому углом i . Итак, яркостью в данном направлении называется поток, посылаемый единицей видимой поверхности в данном направлении внутрь единичного телесного угла.

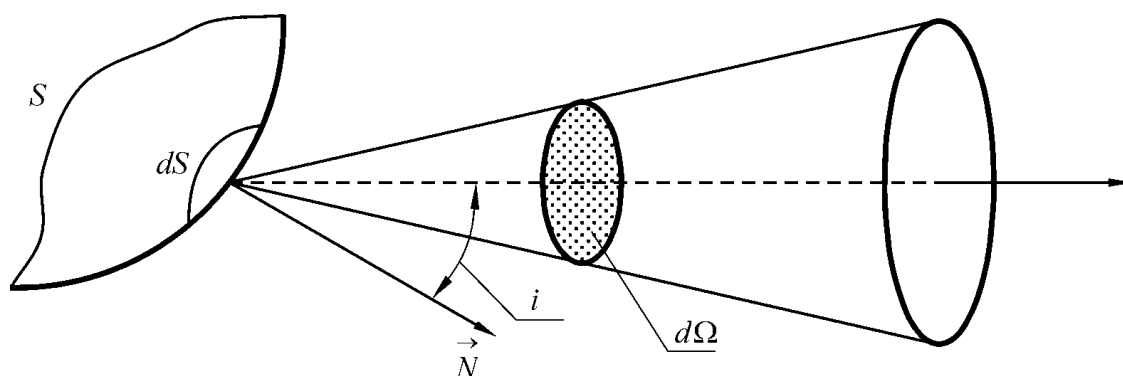


Рис.2. К определению понятия яркости протяженного источника

Для некоторых источников яркость может от направления не зависеть. Такие источники называются источниками, подчиняющимися закону **Ламберта**. Строго говоря, таким источником является только абсолютно черное тело. Матированная поверхность или мутная среда, каждый участок которой рассеивает свет равномерно во все стороны, служат более или менее хорошими подобиями ламбертова источника.

5. **Светимость**. С понятием яркости тесно связано понятие **светимости M** , представляющей собой интегральную величину, т. е. суммарный поток, посылаемой **единицей поверхности** наружу по всем направлениям (внутри телесного угла 2π). Таким образом,

$$M = \frac{\Phi}{S}, \quad (8)$$

если Φ есть полный поток, посылаемый светящейся площадкой S наружу по всем направлениям.

6. **Яркостный контраст** - воспринимаемое глазом различие яркостей двух соприкасающихся независимо освещенных поверхностей одинакового качества. Если рассмотреть известные схемы приборов для подобных измерений - фотометров, придуманных за последние два столетия, станет ясно, что все они основаны на создании контрастирующих световых полей для визуального сравнения. Следует отметить, что глаз легко чувствует самое небольшое различие яркостей и теряется при очень больших яркостях, когда контраст пропадает.

В качестве примера на рис.3 приведена схема фотометра Жоли. Два брусочка из парафина или воска с тонкой прокладкой из непрозрачной металлической фольги освещаются с различных сторон перпендикулярно фольге, а рассматриваются вдоль нее.

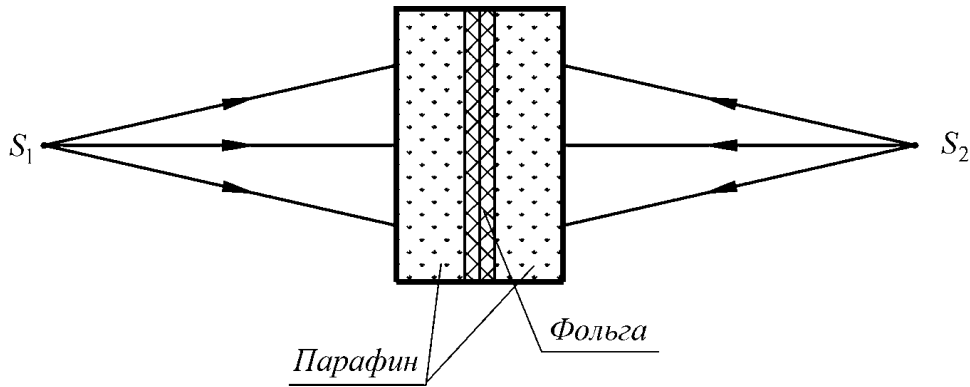


Рис.3. Схема фотометра Жоли

При произвольном положении фотометра между двумя источниками S_1 и S_2 одна половина его как правило кажется глазу существенно ярче другой. Передвигая измерительное устройство вдоль прямой, соединяющей источники света, легко изменить отношение яркостей.

Наиболее изящная схема фотометра сконструирована немецкими оптиками Люммером и Бродхуном. Именно такой фотометр используется в данной лабораторной работе (рис.4).

Главным элементом фотометра Люммера-Бродхуна являются две прямоугольные стеклянные призмы, образующие делительный кубик. Гипотенузная грань одной из призм частично сошлифована на сферу так, что в центре остается плоский участок. Призмы плотно прижимаются одна к другой гипотенузными гранями до так называемого оптического контакта, когда граница для света перестает существовать, образуя как бы сплошное прозрачное тело. Если направить два пучка света на кубик, то каждый из них будет проходить через область оптического контакта без всяких изменений, а части обоих пучков, попавшие на несоприкасающиеся участки гипотенузных граней, испытают полное внутреннее отражение, т.к. угол падения в 45° превышает предельный угол для перехода стекло - воздух. Таким образом, в сторону наблюдателя идут пучки и от левого M_1 , и от правого M_2 зеркал (см. рис.5). За призмным блоком расположен окуляр O , помогающий глазу наблюдателя настроиться на поверхность P_1P_2 . Наблюдатель видит в центре овальное пятно, формируемое из лучей, отраженных левой стороной белого матового экрана, окруженное кольцом из лучей от правой стороны экрана, не перекрывающиеся при точной настройке окуляра на плоскость P_1P_2 . Перемещая один из источников света, можно увидеть овал более ярким, чем кольцо или наоборот, и добиться одинаковой яркости полей сравнения. Тогда можно считать равными освещенности обеих сторон матового экрана.

В соответствии с основным законом фотометрии (Ламберт И. , 1728-1777) освещенность поверхности перпендикулярно направленным к ней пучком света обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника света.

$$E = \frac{\Phi}{\sigma} = \frac{\Phi}{4\pi R^2} \quad (9)$$

или

$$E = \frac{I}{R^2} . \quad (10)$$

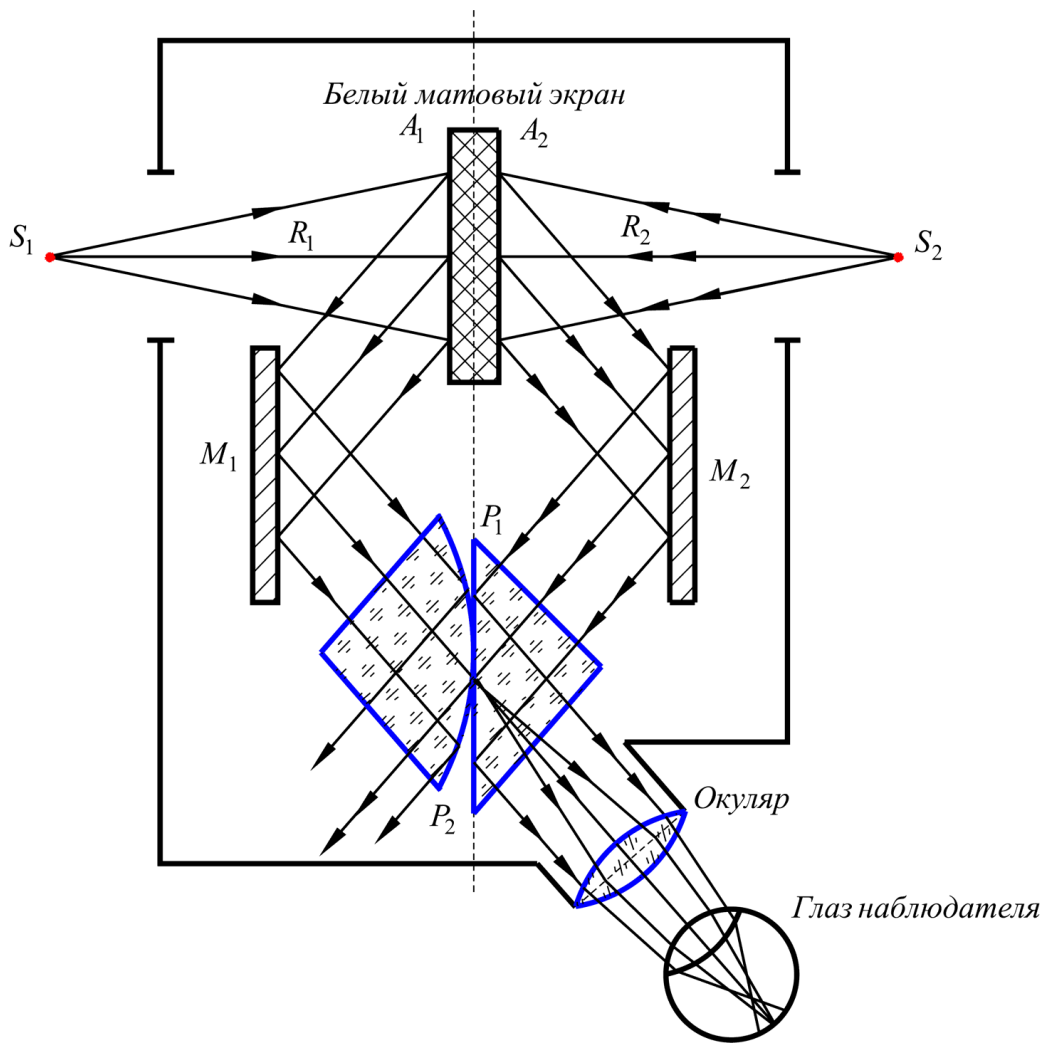


Рис. 4. Схема фотометра Люммера - Бродхуна.

При равенстве освещенностей $E_1 = E_2$

$$\frac{I_1}{R_1^2} = \frac{I_2}{R_2^2}, \quad (11)$$

$$I_1 = I_2 \frac{R_1^2}{R_2^2}. \quad (12)$$

Единицы для световых измерений

Световые и соответствующие им энергетические единицы в системе измерений СИ для перечисленных выше фотометрических величин представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Световые и энергетические единицы

Величины	Обознач.	Единица световая	Символ	Единица энергетическая
Световой поток	Φ	люмен	лм	Вт
Сила света	I	кандела	кд	Вт/ср
Яркость	B	кандела/м ²	кд/м ²	Вт/(ср м ²)
Светимость	S	люмен/м ²	лм/м ²	Вт/м ²
Освещенность	E	люкс	лк	Вт/м ²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Упражнение № 1. Измерение силы света лампы накаливания с помощью фотометра Люммера - Бродхуна.

В лабораторных условиях измерение силы света чаще всего производится на световой скамье (называемой иногда линейным фотометром), представляющей собой устройство, где вдоль направляющих (труб, рельсов) могут перемещаться на рейтерах сравниваемые источники света и фотометрическая головка.

Технические измерения силы света производятся методом прямого сравнения исследуемого источника с образцовым по схеме, представленной на рис. 5.

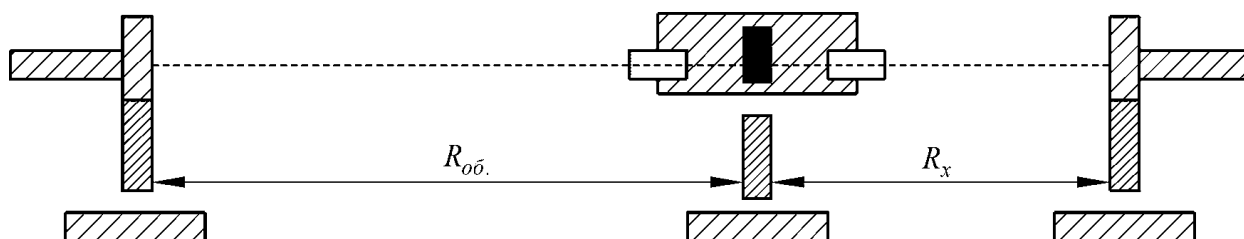


Рис.5. Схема измерения силы света на фотометрической скамье

Испытательная пластинка фотометрической головки с одной стороны освещается исследуемым источником света, а с другой - образцовым, сила света которого известна (рис. 5). Изменяя расположение фотометрической головки между источниками, можно добиться равенства яркостей наблюдаемых полей сравнения, (фотометрическое равновесие). При этом берут отсчет по шкале расстояний, нанесенной на скамье от источников до фотометрической головки. Сила света определяется из выражения

$$I_x = I_{об.} \frac{R_x^2}{R_{об.}^2} \quad (13)$$

Одним из источников света служит образцовая лампа, сила света которой известна при заданном напряжении или силе тока.

Порядок проведения измерений

1. Установить на скамье измерительный кубик (фотометр Люммера - Бродхуна).
2. Включить образцовую и исследуемую лампы.
3. Открыть окна фотометра и с помощью окуляра добиться резкого изображения наблюдаемых полей сравнения.
4. Перемещая фотометр вдоль скамьи, между образцовой и исследуемой лампой добиться равенства освещенности наблюдаемых полей зрения; сделать отсчет $R_{об.}$ и R_x по шкале, расположенной на скамье.
5. По формуле (13) зная $R_{об.}$, R_x и $I_{об.}$ (значение силы света $I_{об.}$ для образцовой лампы указывается преподавателем), вычислить силу света исследуемой лампы I_x . Проведите не менее 10 измерений при разных $R_{об.}$ и R_x , найдите среднее значение \bar{I}_x по формуле

$$\langle I_x \rangle = \frac{I_{x1} + I_{x2} + \dots + I_{xn}}{n} \quad (14)$$

и среднее квадратичное отклонение (погрешность) среднего арифметического по формуле

$$S \langle I_x \rangle = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{xi} - \langle I_x \rangle)^2}{n(n-1)}}, \quad (15)$$

где n число измерений.

Упражнение № 2. Экспериментальная проверка закона Ламберта.

В данном упражнении предлагается экспериментально проверить закон Ламберта, используя фотометрическую скамью, на которой вместо фотометра Люммера - Бродхуна установлен фотоприемник, подсоединенный к микроамперметру.

Порядок проведения измерений

1. Включить образцовую лампу.
2. Снять фотометр Люммера - Бродхуна с фотометрической скамьи.
3. Установить на его место фотоприемник таким образом, чтобы расстояние R_1 между образцовой лампой и светочувствительной поверхностью фотоприемника составляло 20 см.
4. Снять отсчет I_ϕ по шкале микроамперметра.
5. Оценить освещенность E_1 светочувствительной поверхности фотоприемника в относительных единицах, исходя из того, что она прямо пропорциональна силе фототока $I_{\phi 1}$, полагая коэффициент пропорциональности равным α ,

$$E_i = \alpha I_{\phi i}. \quad (16)$$

6. Меняя расстояние R_i с шагом 10 см от $R_1 = 20$ см до $R_5 = 70$ см, повторить задания, изложенные в пунктах 4 и 5; результаты занести в таблицу.

$R_i, \text{ см}$	$I_\phi, \text{ мА}$	$E_i, \text{ отн.ед}$	$E_{\text{выч.}}, \text{ отн.ед}$
-------------------	----------------------	-----------------------	-----------------------------------

7. На основании данных, занесенных в таблицу, показать, что отношение освещенностей обратно пропорционально квадратам расстояний, т. е. удовлетворяют закону Ламберта.

$$\frac{E_i}{E_1} = \frac{R_1^2}{R_i^2} \quad (i = 2, 3, 4, 5). \quad (17)$$

Упражнение № 3. Градуировка фотоприемника

В данном упражнении предлагается построить градуировочный график фотоприемника с целью использования его в качестве измерителя освещенности - люксметра.

Порядок выполнения упражнения

1. Для всех расстояний R_i , указанных в таблице предыдущего упражнения, по формуле (10) вычислить освещенность E , полагая силу света I равной таковой для образцового источника; результаты вычислений занести в последний столбец таблицы.
2. На основании данных этой таблицы построить график зависимости освещенности $E_{\text{выч.}}$ от силы фототока I_ϕ , соответствующий уравнению (16).
3. По наклону графика оценить коэффициент α в уравнении (16).

Упражнение № 4. Построение индикатрисы силы света протяженного источника.

Порядок проведения измерений

1. Поставить на фотометрическую скамью протяженный источник света и фотоприемник так, чтобы светящееся тело источника и головка фотоприемника находились в одной горизонтальной плоскости. Измерить расстояние между ними R_0 .
2. Включить источник и снять отсчет фототока I_ϕ .
3. По формуле

$$I = E R_0^2 = \alpha R_0^2 I_\phi \quad (18)$$

вычислить силу света, приняв α таким же как на градуировочном графике предыдущего упражнения.

4. Поворачивая протяженный источник света в горизонтальной плоскости относительно вертикальной оси, проходящей через источник, в пределах углов $0 \div 180^\circ$ с шагом 10° выполнить задания, изложенные в пунктах 2 и 3, для каждого угла поворота.
5. По результатам измерений построить график зависимости силы света протяженного источника от угла поворота в полярных координатах.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные фотометрические величины и их единицы.
2. Какие источники называют ламбертовыми?
3. Сформулируйте закон Ламберта.
4. Объясните принцип действия фотометров Жоли и Люммера - Бродхуна.
5. Нарисуйте оптическую схему линейного фотометра.

Литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Наука, 1976.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1970.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. - М.: Наука, 1980.
4. Гуревич М. М. Фотометрия: теория, методы и приборы. - Л.: Энергоатомиздат, 1983.