



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Методические указания к
лабораторным работам 5 ФМ, 6 ФМ,
7 ФМ, 8 ФМ, 9 ФМ*

«ФОТОМЕТРИЯ»

Авторы
Ершов И.В.
Жданова Т.П.,
Кудря А.П.,
Лемешко Г.Ф.,
Пруцакова Н.В.

Ростов-на-Дону, 2022

Аннотация

Указания содержат краткое изложение теории основных фотометрических величин. Рассмотрены различные методы измерения основных фотометрических характеристик источников света и материалов, используемых в светотехнике.

Методические указания предназначены для организации самостоятельной работы студентов направления «Электроника и наноэлектроника», профиля «Светотехника и источники света», при подготовке и проведении лабораторного практикума.

Авторы

Ершов И.В. - к.ф.-м.н., доцент
кафедры «Физика»

Жданова Т.П. - к.ф.-м.н., доцент
кафедры «Физика»

Кудря А.П. - старший преподаватель
кафедры «Физика»

Лемешко Г.Ф. - к.ф.-м.н., доцент
кафедры «Физика»

Пруцакова Н.В. - к.ф.-м.н., доцент
кафедры «Физика»

Оглавление

Введение.....	4
Лабораторная работа № 5 ФМ Определение светового потока светодиодов.....	7
Выполнение работы.....	11
Контрольные вопросы.....	14
Лабораторная работа № 6 ФМ Определение силы света лампы накаливания.....	15
Выполнение работы.....	16
Контрольные вопросы.....	19
Лабораторная работа № 7 ФМ Проверка закона освещенности для точечных источников света	19
Выполнение работы.....	21
Контрольные вопросы.....	22
Лабораторная работа № 8 ФМ Определение коэффициента отражения фольги.....	23
Выполнение работы.....	24
Контрольные вопросы.....	26
Лабораторная работа № 9 ФМ Определение коэффициентов отражения и пропускания стекла с помощью фотометра.....	27
Выполнение работы.....	29
Контрольные вопросы.....	31
Литература.....	31
Приложение.....	32

1. Введение

Световой поток — это мощность светового излучения, измеренная в специальных единицах, называемых люменами (сокращенно — лм, иностранное — lm). Люмен — это 1/683 ватта светового монохроматического излучения с длиной волны 555нм, соответствующей максимуму кривой спектральной чувствительности глаза. Величина 1/683 появилась исторически, когда основным источником света были обычные свечи, и излучение только появлявшихся электрических источников света сравнивалось со светом таких свечей. В настоящее время эта величина (1/683) узаконена многими международными соглашениями и принята повсеместно.

Телесный угол ω равен отношению площади S , вырезаемой этим углом на сфере произвольного радиуса r , к квадрату этого радиуса — $\Omega = S/r^2$. Если нормаль к площадке составляет угол α к падающему среднему световому лучу (рис.1), то телесный угол равен

$$d\Omega = \frac{ds}{r^2} \cos \alpha. \quad (1.1)$$

В Международной системе единиц СИ телесный угол измеряется встерадианах (ср).

Сила света — это отношение светового потока, заключенного в каком-либо телесном угле, к величине этого угла:

$$I = d\Phi / d\Omega \quad (1.2)$$

Если источник света светит равномерно по всему пространству, то есть в телесном угле 4π (так как площадь сферы равна $4\pi \cdot R^2$), то сила света такого источника равна $\Phi / 4\pi$. Сила света измеряется в канделах (сокращенно – кд, иностранное - cd). Одна кандела—это сила света источника, излучающего световой поток 1 лм в телесном угле 1 ср.

Освещенность—это величина светового потока, приходящаяся на единицу площади освещаемой поверхности. Если

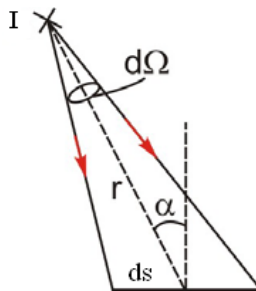


Рис.1. К определению телесного угла

световой поток $d\Phi$ падает на какую-то площадь dS , то средняя освещенность этой площади равна:

$$E = d\Phi/dS. \quad (1.3)$$

Единица измерения освещенности называется люксом (лк). Один люкс — это освещенность, при которой световой поток 1 лм падает на площадь в 1 квадратный метр: $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм}/1 \text{ м}^2$.

Освещенность площадки точечным источником света, с учетом (1.1)–(1.3), равна:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha. \quad (1.4)$$

Светимость M – световой поток, испускаемый единицей площади протяженного источника излучения по всем направлениям (в пределах телесного угла 2π стерадиан):

$$M = d\Phi/dS \quad (1.5)$$

Единица измерения $1 \text{ лм}/\text{м}^2$.

Яркость L поверхности S —это отношение силы света I , излучаемой этой поверхностью в каком либо направлении, к площади проекции этой поверхности на плоскость, перпендикулярную выбранному направлению (рис.2).

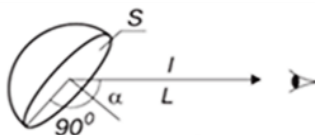


Рис.2. К определению яркости

$$L = \frac{I}{\Delta s \cdot \cos \alpha}. \quad (1.6)$$

С учетом (1.2) уравнение (1.6) запишем в виде:

$$L = \frac{d\Phi}{d\Omega \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha}. \quad (1.7)$$

За единицу измерения яркости сейчас во всех странах принята яркость плоской поверхности, излучающей силу света в 1 кд с одного квадратного метра в направлении, перпендикулярном светящейся поверхности, то есть $1 \text{ кд}/\text{м}^2$.

Источники света, яркость (L) которых не зависит от направления, называются ламбертовскими или косинусными. Закон Ламберта следует из формулы (1.7):

$$I = I_0 \cos \alpha, \quad (1.8)$$

где I_0 – сила света, излучаемая источником ΔS в направлении нормали ($\sigma = 0$).

Светимость и яркость ламбертовского источника связаны простым соотношением:

$$M = \pi \cdot L. \quad (1.9)$$

Получена эта связь из формулы (1.7) интегрированием в сферических координатах. Идеальным косинусным излучателем является только абсолютно черное тело. Хорошо подчиняется закону Ламберта и Солнце. В случае несамосветящихся поверхностей с достаточной точностью ламбертовским источником является матовая поверхность, равномерно рассеивающая свет во все стороны (например, светильник из молочного стекла).

От чего же зависит яркость предметов? Прежде всего, от величины светового потока, падающего на них, и от свойств самих предметов, а именно - от их способности отражать падающий свет (рис.3).

Способность предметов отражать падающий на них свет характеризуется *коэффициентом отражения*:

$$\rho = \Phi_{\text{отр.}} / \Phi_{\text{пад.}} \quad (1.10)$$

Доля света, которая проходит сквозь материал, характеризуется *коэффициентом пропускания*, а доля, которая поглощается — *коэффициентом поглощения*:

$$\tau = \Phi_{\text{прош.}} / \Phi_{\text{пад.}}, \quad (1.11)$$

$$a = \Phi_{\text{погл.}} / \Phi_{\text{пад.}}$$

Соотношения между этими коэффициентами:

$$\rho + \tau + a = 1. \quad (1.12)$$

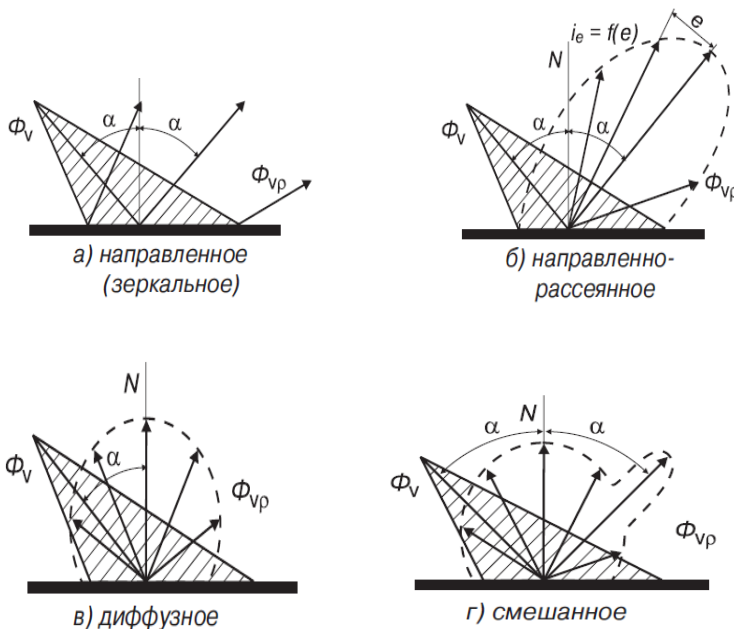


Рис.3. Виды отражающих поверхностей

Лабораторная работа № 5 ФМ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТОГО ПОТОКА СВЕТОДИОДОВ

Цель работы: определение светового потока исследуемого светодиода и его световой отдачи.

Оборудование: интегрирующая сфера ТКА-КК1, эталонный источник света, набор светодиодов.

Краткая теория

Описание измерительной установки и метода измерений

Для оперативного проведения простых технологических измерений полного светового потока используют интегрирующую сферу (фотометрический или светомерный шар), представляющую собой полый



Рис. 1.

шар, внутренняя поверхность которого покрыта белой матовой краской с высоким коэффициентом отражения и рассеивающего свет в соответствии с законом Ламберта. Диаметр сферы должен превышать шестикратное значение общей длины ламп (без цоколя), а для трубчатых – не менее 1,5-кратного значения общей длины. На рис. 1 показана интегрирующая сфера диаметром 2 м.

Достоинством метода «интегрирующей сферы» (сферы Ульбрихта) является то, что он позволяет проводить измерения светового потока источника с произвольным распределением излучения в окружающем пространстве.

В интегрирующей сфере световой поток исследуемого источника света сравнивается со световым потоком стандартной лампы при неизменной температуре. Актуальность измерений светового потока обусловлена контролем качества источников света, соответствие их рабочим стандартам и измерения показателей цвета с помощью колориметра.

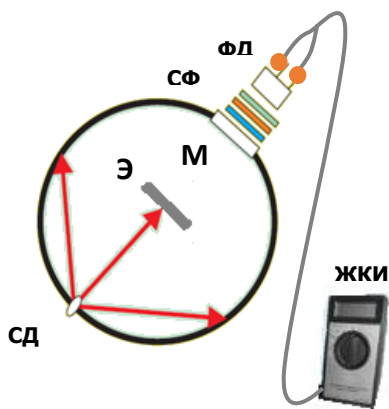


Рис.2.

В данной работе используется интегрирующая сфера типа ТКА-КК1, предназначенная для измерения полного светового потока светодиодов в видимой области спектра (от 380 до 780 нм). Конструктивно прибор состоит из двух функциональных блоков. Диаметр сферы 140 мм, приёмник света – фотодиод ФД, размещённый в одной из полусфер (рис.2). Перед фотодиодом установлены корректирующие светофильтры СФ и молочное стекло М. Корректирующие свето-фильтры служат для приведения спектральной характеристики чувствительности кремниевое фотодиода $S(\lambda)$ к относительной световой спектральной эффективности $V(\lambda)$,

табулированные значения которой регламентированы решениями комиссии МКО и ГОСТ 8.332 (рис.3).

Чувствительность кремниевого фотодиода $S(\lambda)$ максимальна в инфракрасной области, поэтому установленные перед фотодиодом корректирующие светофильтры (синий, красный, зеленый) уменьшают световые потоки излучения в длинно-волновом и коротковолновом диапазонах видимого спектра. Матовое стекло создает равномерный световой поток, входящий в фотодиод. Фотодиод с корректирующими светофильтрами и матовым стеклом образуют фотоприемник. В интегрирующей сфере имеется входной тубус для установки светодиодов СД диаметром до 14 мм и сменных диафрагм, входящих в комплект для позиционирования светодиодов диаметрами 3,5,9 мм. Для предотвращения прямого попадания излучения в фотоприемник перед ним установлен экран Э. Излучение светодиода равномерно рассеивается внутренней стенкой шара и преобразуется фотоприемным устройством в электрический сигнал. Величина освещенности внутренней поверхности сферы в лк выводится на цифровой жидкокристаллический индикатор ЖКИ. Прибор позволяет измерять световой поток в диапазоне (1 – 2000) лм. Погрешность измерения светового потока не превышает 10%.

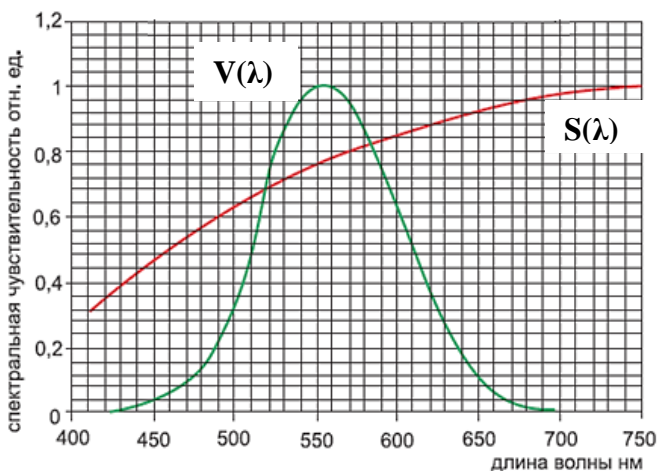


Рис.3.

Теория фотометрического шара [3] показывает, что световой поток, рассеиваемый его внутренней стенкой, распределяется по ней весьма равномерно. Поэтому если внутрь полой сферы, стенка которой имеет во всех точках одинаковый коэффициент отражения ρ , поместить источник S , излучающий световой поток Φ , то

отраженный от стенки шара поток $\Phi_1 = \rho \cdot \Phi$ создаст во всех точках одну и ту же освещенность

$$E_1 = \rho \cdot \Phi / (4\pi \cdot r^2), \quad (1)$$

где r — радиус поверхности шара.

Вторично отраженный световой поток $\Phi_2 = \rho \cdot \Phi_1 = \rho^2 \Phi$ снова равномерно распределится по стенке шара, и дополнительная освещенность окажется: $E_2 = \rho^2 \cdot \Phi / (4\pi \cdot r^2)$, и так далее, до бесконечности. Общую (суммарную) освещенность в некоторой точке M на внутренней поверхности шара можно рассчитать по формуле:

$$E_{об} = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{\Phi}{4\pi \cdot r^2} = \alpha \cdot \Phi, \quad (2)$$

где α — коэффициент пропорциональности, зависящий только от свойств шара.

Поэтому если испытуемый источник S со световым потоком Φ заменить внутри шара на контрольный источник S_k с известным световым потоком Φ_k , то очевидно, что освещенность в точке M будет:

$$E_k = \alpha \cdot \Phi_k. \quad (3)$$

Или, разделив выражение (3) на (4), получим:

$$\Phi = (\Phi_k E) / E_k. \quad (4)$$

Установив тем или другим способом отношение освещенностей, можно определить световой поток Φ интересующего нас источника. Определив реакцию фотодиода на излучение — например, фототоки, возникающие в измерительной цепи, — находим отношение i/i_k и E/E_k , которые можно считать равными между собой, и вычисляем световой поток Φ согласно выражению (4). В результате реализации на практике вышеизложенного метода получено рабочее средство измерения полного потока, показанного на рис. 2. Погрешность измерения полного светового потока белых светодиодов составила 7,0%, цветных светодиодов — 10,0%.

В интегрирующей сфере ТКА-КК1 фотоприемное устройство совместно с электронным блоком регистрирует полный световой поток в лм.

Если измерить потребляемую источником света электрическую мощность - $P=IU$, то можно определить его световую

отдачу:

$$\eta = \Phi / P. \quad (5)$$

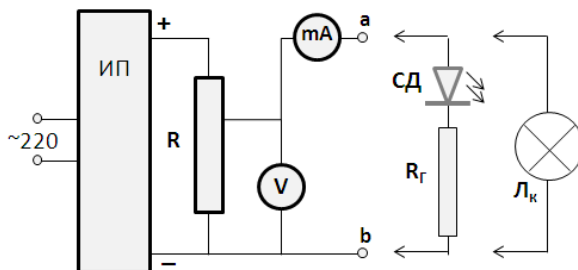


Рис.4.

Принципиальная схема питания светодиода СД или контрольной лампы накаливания L_k представлена на рис. 4. Постоянное напряжение, подаваемое на источник света, регулируется делителем напряжения R , который подсоединен к источнику питания ИП. При подключении к зажимам **a** и **b** контрольной лампы ее потребляемая электрическая мощность равна:

$$P = i \cdot U_k = i(U - i \cdot R_A), \quad (6)$$

где i – показание амперметра (миллиамперметра); U – показание вольтметра; R_A – сопротивление амперметра.

При подключении к зажимам **a** и **b** светодиода его потребляемая электрическая мощность равна

$$P = i \cdot U_{CD} = i(U - i \cdot (R_A + R_G)), \quad (7)$$

где R_G – сопротивление гасящего резистора; i – показание амперметра (миллиамперметра); U – показание вольтметра; R_A – сопротивление амперметра.

Выполнение работы

Задание 1. *Исследование зависимости светотехнических характеристик лампы накаливания от приложенного напряжения.*

1. Установить в интегрирующую сферу контрольную лампу накаливания L_k .

2. Собрать схему (рис.4), а к зажимам **a** и **b** подключить контрольную лампу. На вольтметре и амперметре установить пределы измерений и определить цены их делений.

3. Установить делитель напряжения так, чтобы на его выходе

$U=0$.

4. Включить в сеть источник питания и увеличивать напряжение с помощью делителя до тех пор, пока через контрольную лампу не будет протекать максимальный ток, указанный в ее паспорте.

5. Записать показания вольтметра и амперметра и вычислить по формуле (6) потребляемую лампой мощность.

6. Измерить световой поток Φ , создаваемый контрольной лампой внутри интегрирующей сферы.

7. По формуле (5) вычислить световую отдачу лампы.

8. Уменьшать величину тока с шагом 0,02 А. Для каждого значения тока i : 1) измерить световой поток внутри поверхности сферы; 2) вычислить световую отдачу по формуле (5).

8. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 1.

$R_A = \dots$

Таблица 1

№, п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i, A									
U, B									
$P, Bт$									
$\Phi, лм$									
η									

9. Построить график зависимости $\eta(i)$.

Задание 2. *Исследование зависимости светотехнических характеристик светодиода с белым свечением от приложенного напряжения.*

1. Установить в интегрирующую сферу светодиод с белым свечением диаметром 5 мм.

2. К зажимам **a** и **b** подключить исследуемый светодиод. На вольтметре и амперметре установить пределы измерений и определить цены их делений.

3. Установить делитель напряжения так, чтобы на его выходе

$U=0$.

4. Включить в сеть источник питания и увеличивать напряжение с помощью делителя до тех пор, пока через светодиод не будет протекать максимальный ток – 20 мА.

5. Записать показания вольтметра и амперметра и вычислить по формуле (7) потребляемую светодиодом мощность P .

6. Измерить световой поток, создаваемый светодиодом внутри интегрирующей сферы.

7. По формуле (5) вычислить световую отдачу.
8. Уменьшать величину тока с шагом 0,01 А. Для каждого значения тока i повторить пункты 5 -7.
9. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 2.

$$R_A = \dots R_{\Gamma} = \dots$$

Таблица 2

№, п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i, \text{А}$									
$U, \text{В}$									
$P, \text{Вт}$									
$\Phi, \text{лм}$									
η									

10. Построить график зависимости $\eta(i)$.
11. Установить в интегрирующую сферу светодиод с белым свечением диаметром 9 мм и повторить пункты 2–10.
12. Сопоставить полученные результаты светодиодов диаметрами 5 и 9 мм, сделать вывод.
13. Сопоставить полученные результаты светодиодов с контрольной лампой, сделать вывод.

Задание 3. *Исследование зависимости светотехнических характеристик светодиода с цветным свечением от приложенного напряжения.*

1. Установить в интегрирующую сферу светодиод с красным (жёлтым) свечением диаметром 5 мм.
2. К зажимам **а** и **б** подключить исследуемый светодиод. На вольтметре и амперметре установить пределы измерений и определить цены их делений.
3. Установить делитель напряжения так, чтобы на его выходе $U=0$.
4. Включить в сеть источник питания и увеличивать напряжение с помощью делителя до тех пор, пока через светодиод не будет протекать максимальный ток – 20 мА.
5. Записать показания вольтметра и амперметра и вычислить по формуле (7) потребляемую светодиодом мощность P .
6. Измерить световой поток, создаваемый светодиодом внутри интегрирующей сферы.
7. По формуле (5) вычислить световую отдачу.
8. Уменьшать величину тока с шагом 0,01 А. Для каждого значения тока i повторить пункты 5-7.
9. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 3.

$R_A = \dots R_T = \dots$

Таблица 3

№, п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
i, A									
U, B									
$P, Bт$									
$\Phi, лм$									
η									

10. Построить график зависимости $\eta(i)$.

11. Установить в интегрирующую сферу светодиод с зеленым (синим) свечением диаметром 5 мм и повторить пункты 2 – 10.

12. Сопоставить полученные результаты цветных светодиодов, сделать вывод.

13. Сопоставить полученные результаты цветных светодиодов с результатами светодиодов с белым свечением, сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Как устроен светомерный шар и какой диаметр он должен иметь?

2. Каково назначение интегрирующей сферы типа ТКА-КК1?

3. Что представляет собой фотоприемное устройство и каково назначение корректирующих светофильтров?

4. Что называется световым потоком и как его измеряют в данной работе?

5. Приведите принципиальную схему измерительной установки и объясните ее работу.

6. Как определить потребляемую источником света электрическую мощность?

7. Как определяют в данной работе световую отдачу?

8. Какая цель данной работы и в какой последовательности ее выполняют?

Лабораторная работа № 6 ФМ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ СВЕТА ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Цель работы: определение силы света исследуемой лампы накаливания.

Оборудование: измерительная установка.

Краткая теория

Измерительная установка состоит из оптической скамьи, на которой установлены (рис.1): контрольная лампа накаливания с известной силой света I_k ; исследуемая лампа накаливания с неизвестной силой света I ; между лампами находится экран \mathcal{E} , в центре которого закреплен датчик \mathcal{D} люксметра \mathcal{L} . Поверхность датчика перпендикулярна световому потоку. Экран можно перемещать вдоль оптической скамьи и фиксировать его положение по миллиметровой измерительной шкале $\mathcal{Ш}$.

Контрольная лампа подключается к сетевому напряжению 220В. Напряжение на исследуемой лампе можно изменять в широких пределах с помощью лабораторного автотрансформатора ЛАТР, а контролировать его величину по вольтметру, который находится в корпусе ЛАТРа или может быть выносным.

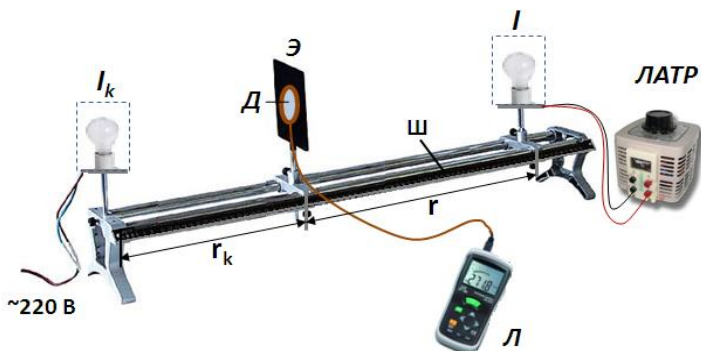


Рис.1. Описание измерительной установки и метода измерений

Данная измерительная установка позволяет, согласно (1.4), исследовать зависимость освещенности, создаваемой как контрольной, так и исследуемой лампой, от расстояния $E(r)$. Кроме того, во-первых, зная освещенность датчика люксметра от контрольной

лампы для нескольких расстояний r_k , можно оценить силу света этой лампы по формуле $I_k = E_k r_k^2$ и сопоставить ее усредненное значение с паспортным. Во-вторых, по снятым зависимостям освещенности исследуемой и контрольной ламп от расстояния можно определить расстояние r , на котором освещенности датчика люксметра от этих ламп совпадают, т.е. $E = E_k$. Учитывая, что $E = I / r^2$ и $E_k = I_k / r_k^2$ можно определить силу света исследуемой лампы для номинального напряжения, по формуле $I = I_k r^2 / r_k^2$. В-третьих, определяя по аналогичной методике силу света для разных напряжений, можно установить зависимость силы света исследуемой лампы от напряжения $I(U)$.

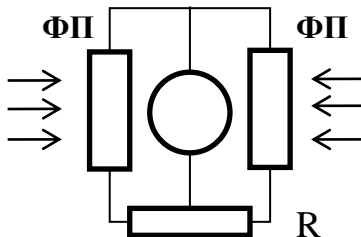


Рис. 2.

Существует другой метод определения точки одинаковой освещенности между двумя лампами. Два фотоприемника ФП укреплены с двух сторон экрана и служат плечами мостовой схемы (рис.2). В диагональ моста включен нуль-гальванометр. Делитель напряжения R служит для настройки схемы. В точке одинаковой освещенности в ФП возникают одинаковые фото-эдс, направленные навстречу, и в диагонали моста $I = 0$.

Выполнение работы

Задание 1. *Определение силы света исследуемой лампы накаливания при номинальном напряжении.*

1. Установить экран на оптической скамье так, чтобы датчик люксметра был обращен к контрольной лампе (рис.1) и его фотоприемная поверхность была перпендикулярна к световому потоку.

2. Включить люксметр, согласно прилагаемой инструкции, и измерить фоновую освещенность E_0 ,

3. Установить экран с датчиком люксметра на минимальное

расстояние от контрольной лампы и включить ее в сеть 220 В. Положение контрольной лампы совпадает с нулем координатной оси OX .

4. Измерить освещенность E' датчика люксметра на этом расстоянии.

5. Экран с датчиком люксметра удалять от лампы с шагом 5 см и для каждого расстояния повторить пункт 4.

6. Вычислить действительную освещенность датчика люксметра для каждого расстояния по формуле $E_k = E'_k - E_0$.

7. Экран с датчиком люксметра установить на минимальном расстоянии r от исследуемой лампы так, чтобы его фотоприемная поверхность была перпендикулярна к световому потоку. Следует учесть, что $r = x - r_k$, где x – координата исследуемой лампы; r_k – расстояние от контрольной лампы до экрана (см. рис.1).

8. Включить в сеть ЛАТР и установить с его помощью напряжение на исследуемой лампе 220 В.

9. Повторить пункты 4-6 для исследуемой лампы и вычислить действительную освещенность датчика люксметра для каждого расстояния, по формуле $E = E' - E_0$.

10. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.

11. В одних координатных осях построить графики зависимостей $E_k(r_k)$ и $E(r)$, учитывая, что исследуемая лампа находится в координате x (рис.3).

$E_0 = \dots$ лк

Таблица 1

$r, r_k,$ $10^{-2}м$	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$E'_k, лк$											
$E_k, лк$											
$E', лк$											
$E, лк$											

12. На пересечении графиков зависимостей $E_k(r_k)$ и $E(r)$ определить расстояния, на которых освещенности датчика люксметра от контрольной и исследуемой ламп равны.

13. По формуле $I = I_k r^2 / r_k^2$ определить силу света исследуемой лампы для напряжения 220 В.

14. Установить экран с двумя фотоприемниками ФП, найти между лампами точку с одинаковой освещенностью и повторить пункт 13. Сопоставьте результаты и сделайте вывод.

Задание 2. Установить зависимость силы света исследуемой лампы от приложенного к ней напряжения.

1. С помощью ЛАТРа уменьшать напряжение на исследуемой лампе на ΔU . Уменьшение напряжения приведет к уменьшению освещенности и смещению точки пересечения графиков $E_k(r_k)$ и $E(r)$ вправо.

2. Установить экран с датчиком люксметра ближе к исследуемой лампе на 5 см от начального положения, соответствующего точке пересечения графиков $E_k(r_k)$ и $E(r)$ при напряжении 220 В (см. рис.3).

3. Для этого расстояния определить по графику $E_k(r_k)$ освещенность датчика E_k , а с учетом освещенности фона $E'_k = E_k + E_0$.

4. Уменьшать с помощью ЛАТРа напряжение до тех пор, пока показания люксметра станут равным E'_k .

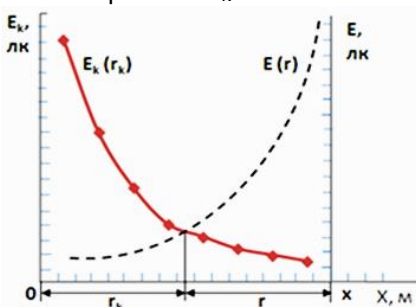


Рис.3.

5. По формуле $I = I_k r^2 / r_k^2$ определить силу света исследуемой лампы для этого напряжения.

6. Последовательно уменьшать расстояние между датчиком люксметра и исследуемой лампой с шагом 5 см и для каждого расстояния r повторить пункты 3-5.

7. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 2.

Таблица 2

r/r_k	20/30									
E'_k , лк										
U , В										
I , кд										

8. Построить график зависимости силы света исследуемой лампы от приложенного к ней напряжения: $I(U)$.

9. По выполненной работе сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется силой света, в каких единицах она измеряется?
2. Какие существуют методы определения силы света?
3. Приведите оптическую схему измерительной установки и объясните назначение каждого ее узла.
4. Как в эксперименте учесть фоновую освещенность?
5. Перечислите источники погрешностей в эксперименте.

Лабораторная работа № 7 ФМ

ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОСВЕЩЕННОСТИ ДЛЯ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Цель работы: 1) проверить зависимость освещенности, создаваемой точечным источником света, от расстояния и от угла падения; 2) определить силу света, излучаемого лампой.

Оборудование: оптическая скамья, лампа накаливания, люксметр, транспортер, источник напряжения.

Краткая теория

Источник света, размеры которого малы по сравнению с расстоянием от него до освещаемой поверхности, называется *точечным*. Освещенность точечным источником поверхности площадью S , расположенной на расстоянии r от него, определяется уравнением (1.4):

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha, \quad (1)$$

где α – угол между направлением лучей света и нормалью, восстановленной к освещаемой площадке.

Уравнение (1) называется законом освещенности для

точечных источников света или *законом обратных квадратов*.

Оценку диапазона расстояний, для которых выполняется закон обратных квадратов и его проверку (1) осуществляют с помощью установки, изображенной на рис. 1.

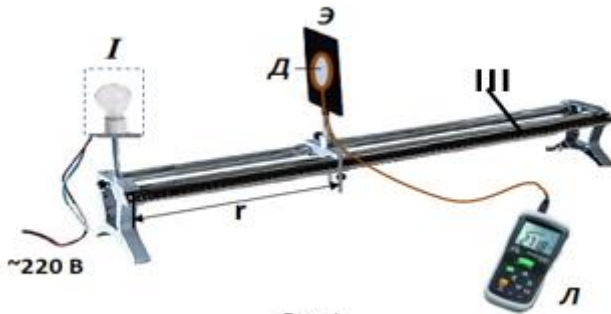


Рис. 1.

На оптической скамье установлены: лампа накаливания с неизвестной силой света I ; экран Э, в центре которого закреплен датчик Д люксметра Л. Поверхность датчика перпендикулярна световому потоку. Экран можно перемещать вдоль оптической скамьи и фиксировать его положение по миллиметровой измерительной шкале Ш.

Область выполнения закона обратных квадратов можно определить из уравнения (1). Освещенность исследуемой лампой датчика люксметра на двух произвольных расстояниях (при $\alpha = 0$):

$$E_1 = \frac{I}{r_1^2} \text{ и } E_2 = \frac{I}{r_2^2}. \quad (2)$$

Делением уравнений (2) получим тождество, свидетельствующее о выполнении закона обратных квадратов:

$$\frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2. \quad (3)$$

В области выполнения закона обратных квадратов сила света точечного источника при освещенности датчика люксметра E , расположенного на расстоянии r от источника и $\alpha = 0$ равна:

$$I = E \cdot r^2. \quad (4)$$

Проверку косинусной зависимости освещенности от угла падения света в области выполнения закона обратных квадратов осуществляют при неизменном расстоянии на этой же установке.

Тогда на экран прикрепляют транспортир, в подвижной части которого устанавливают датчик люксметра.

Выполнение работы

Задание 1. *Определение области выполнения закона обратных квадратов*

1. Соберите установку в соответствии с рис. 1. Датчик люксметра и лампа должны находиться на одной высоте.

2. Включите люксметр, закрепите его датчик в центре экрана и измерьте фоновую освещенность E_0 .

3. Включите исследуемую лампу и установите поверхность датчика люксметра перпендикулярно световому потоку.

4. Запишите показания люксметра E_1' на минимальном расстоянии r_1 датчика от лампы.

5. Вычислите истинное значение освещенности датчика люксметра на расстоянии r_1 : $E_1 = E_1' - E_0$. 6. Повторите пункты 4, 5 для других расстояний. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 1.

$E_0 = \dots\dots\dots$ лк

Таблица 1

№, п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r , м	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
E' , лк									
E , лк									
E_1/E_{1+k}	----								
$(r_{1+k}/r_1)^2$	----	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36	0,49	0,64	0,81
I , кд									
ΔI , кд									
ε , %									

7. Вычислите отношения $(r_{1+k}/r_1)^2$ и E_1/E_{1+k} .

8. Сопоставьте полученные результаты и их соответствие тождеству (3). Установите диапазон расстояний, для которых выполняется закон обратных квадратов.

9. Для нескольких расстояний, в пределах установленной области, по формуле (4) вычислите силу света I исследуемой лампы.

10. Определите среднее значение силы света исследуемой лампы и оцените погрешности измерений.

Задание 2. Проверка зависимости освещенности от угла падения

1. Установите на экран транспортер, а в его подвижную часть – датчик люксметра.

2. В области выполнения закона обратных квадратов установите транспортер на фиксированном расстоянии l .

3. Изменяя угол падения света от исследуемой лампы в интервале от 0 до 90° , с шагом 10° , для каждого угла падения запишите показания люксметра E_i' .

4. Для каждого угла падения, например, α_i вычислите истинное значение освещенности датчика люксметра - $E_i = E_i' - E_0$, где: E_0 - фоновая освещенность; E_i' – показания люксметра для угла падения i .

5. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 2.

$E_0 = \dots\dots\dots$ лк

Таблица 2

№, п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α , гр.	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
E_i' , лк										
E , лк										

6. Построить график зависимости освещенности поверхности датчика от угла падения на него света $E(\alpha)$. Установить, выполняется косинусная зависимость освещенности от угла падения света.

7. По выполненной работе сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется световым потоком?
2. Дайте определение фотометрических величин: сила света; освещенность; светимость источника света; яркость источника света.
3. В чем заключается закон обратных квадратов?
4. В чем заключается закон Ламберта?
5. Какие источники света называются точечными?
6. Какие источники света называются изотропными?
7. Какие источники света называются косинусными? Приведите примеры.

Лабораторная работа № 8 ФМ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ФОЛЬГИ

Цель работы: 1) определить силу света, излучаемого лампой; 2) исследовать отражение света экраном из фольги и определить ее коэффициент отражения.

Оборудование: оптическая скамья, лампа накаливания, люксметр, источник напряжения, экран с фольгой.

Краткая теория

Для определения коэффициента отражения фольги используют установку, изображенную на рис. 1. На оптической скамье установлены: лампа накаливания ЛН с неизвестной силой света I ; экран Э, в центре которого закреплен датчик Д люксметра Л, экран с фольгой Ф. Поверхность датчика перпендикулярна световому потоку. Лампу и экраны с фольгой и датчиком люксметра можно перемещать вдоль оптической скамьи и фиксировать их положение по миллиметровой измерительной шкале Ш.

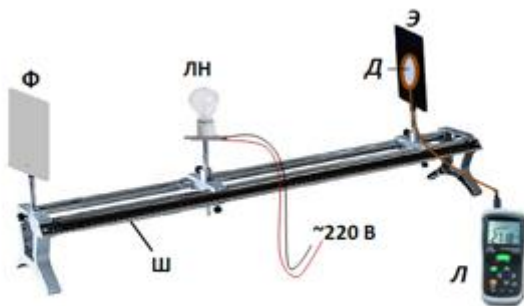


Рис.1.

Для определения силы света лампы накаливания экран с фольгой Ф снимают и устанавливают область выполнения закона обратных квадратов (1.4). Измерив на любом расстоянии из установленной области освещенность поверхности датчика люксметра (для $\alpha=0$), найдем силу света:

$$I = E \cdot r^2. \quad (1)$$

Предположим, что на месте экрана с фольгой Ф (рис.1) установлен зеркальный экран. Для расчета освещенности, создаваемой зеркальным экраном, воспользуемся оптической схемой (рис.2).

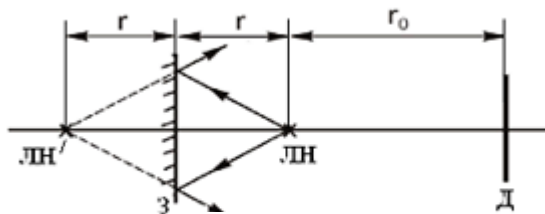


Рис.2.

По закону отражения изображение лампы накаливания ЛН' в плоском зеркале З является мнимым и находится по другую сторону от зеркала на таком же расстоянии r , как и лампа. Если зеркало идеальное, то сила света, отраженного от зеркала, равна силе света, падающего на зеркало от лампы. Поэтому можно считать, что зеркало работает, как дополнительный точечный источник света. Освещенность (теоретическая), создаваемая им, в соответствии с формулой (1.4), равна:

$$E_{теор} = \frac{I}{(r_0 + 2r)^2}, \quad (2)$$

где r_0 – расстояние от лампы до датчика люксметра.

Если зеркало не идеальное, то измеренная на опыте освещенность датчика люксметра $E_{эксп} \neq E_{теор}$. Величину, равную отношению экспериментальной освещенности к теоретической, называют коэффициентом отражения зеркала (1.10)

$$k = \frac{E_{эксп}}{E_{теор}} = \frac{E - E_0}{E_{теор}}, \quad (3)$$

где E_0 – освещенность, создаваемая лампой; E – суммарная освещенность, создаваемая лампой и зеркалом.

Формула (3) используется в работе для изучения влияния на освещенность датчика люксметра экрана из фольги и определения его коэффициента отражения.

Выполнение работы

Задание 1. Определение силы света точечного источника

1. Соберите установку в соответствии с рис.1. Датчик люксметра и лампа должны находиться на одной высоте.
2. Включите люксметр и измерьте фоновую освещенность (E_f) рабочей области.
3. Включите в сеть лампу накаливания и установите ее на минимальном расстоянии r_0 от датчика люксметра.

4. Запишите показания люксметра E_1' на расстоянии r_0 датчика от лампы.

5. Вычислите истинное значение освещенности датчика люксметра на расстоянии r_0 : $E_1 = E_1' - E_\phi$. 6. Повторите пункты 4, 5 для других расстояний. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 1.

$E_\phi = \dots\dots\dots$ лк

Таблица 1

№, п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r_0 , м	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
E' , лк									
E , лк									
r_0^2 , лк ²									
I , кд									
ΔI , кд									
ε , %									

7. Постройте график зависимости освещенности E от $1/r_0^2$.

Сделайте заключение о расстояниях, не противоречащих модели точечного источника.

8. Для нескольких расстояний, в пределах области выполнения закона обратных квадратов, по формуле (1) вычислите силу света (I) исследуемой лампы.

9. Определите среднее значение силы света исследуемой лампы и оцените погрешности измерений.

Задание 2. *Определение коэффициента отражения фольги*

1. Установите лампу на расстоянии $r_0 \approx 25-30$ см от датчика люксметра.

2. Измерьте освещенность E' , создаваемую лампой на этом расстоянии. Вычислить истинную освещенность E_0 , создаваемую лампой, с учетом фоновой освещенности E_ϕ : $E_0 = E' - E_\phi$.

3. На расстоянии r от лампы (рис. 2) установите экран из фольги. Измерьте освещенность E'' , создаваемую лампой и фольгой.

4. Определите суммарную освещенность, создаваемая лампой и зеркалом (фольгой) – $E = E'' - E_\phi$.

5. Пункты 3 и 4 повторить для нескольких расстояний r (от 5 до 20 см). Вычислите экспериментальное значение освещенности

$$E_{\text{эксп}} = E - E_0.$$

6. Для этих же расстояний рассчитайте по формуле (2) теоретическое значение освещенности $E_{\text{теор}}$, создаваемой идеальным зеркалом. В вычислениях используйте среднее значение силы света, полученное в п. 9 задания 1.

7. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 2.

$$E_{\phi} = \dots\dots\dots \text{лк}; E_0 = \dots\dots\dots \text{лк};$$

Таблица 2

№, п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r , м	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	
E'' , лк									
E , лк									
$E_{\text{эксп}}$, лк									
$(r_0 + 2r)^2$									
$E_{\text{теор}}$, лк									
k									
Δk									
ε , %									

8. По формуле (3) рассчитайте коэффициент отражения исследуемой в работе фольги.

9. Определите среднее значение коэффициента отражения фольги и оцените погрешности измерений.

10. По выполненной работе сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение фотометрических величин: световой поток; сила света; освещенность; светимость источника света; яркость источника света.

2. В чем заключается закон обратных квадратов? Как устанавливают область выполнения закона обратных квадратов?

3. Как определяют силу света точечного источника?

4. Приведите оптическую схему для расчета освещенности, создаваемую зеркальным экраном.

5. Как строят изображение в плоском зеркале?

6. Как рассчитать освещенность датчика люксметра от мнимого источника света?

7. Какие существуют отражающие поверхности?

8. Что называется коэффициентом отражения?

9. Что называется коэффициентами поглощения и пропускания? Как они взаимосвязаны между собой?

10. Как в данной работе определяют коэффициент отражения фольги?

Лабораторная работа № 9 ФМ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОПУСКАНИЯ СТЕКЛА С ПОМОЩЬЮ ФОТОМЕТРА

Цель работы: 1) познакомиться с устройством и принципом действия фотометра; 2) определение с помощью фотометра коэффициентов отражения, пропускания и поглощения стекла.

Оборудование: фотометр ФМ-56; набор стекол.

Краткая теория

В светотехнике широко используются разнообразные материалы при изготовлении источников света, световых приборов и т.п. Наряду с различными свойствами материалов (механическими, тепловыми, электрическими и т.д.), проектировщикам важно знать коэффициенты пропускания и поглощения веществом света, а также коэффициент отражения света их поверхностью. Измерения этих коэффициентов осуществляют с помощью различных фотометров. В данной работе используется фотометр ФМ-56. В основу устройства фотометра положен принцип уравнивания двух световых потоков путем изменения одного из них с помощью диафрагмы с переменным отверстием.

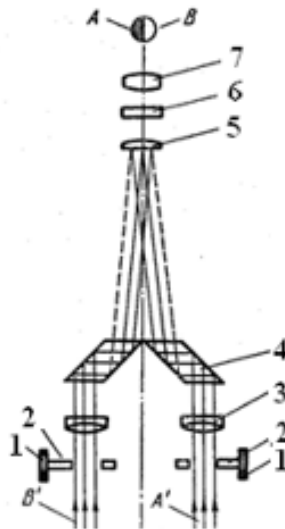


Рис.1.

Главным узлом фотометра является фотометрическая головка, оптическая схема которой приведена на рис.1. Два параллельных световых пучка A' и B' , прошедших сквозь прозрачные твердые тела или отразившиеся от их поверхностей, попадают в фотометрическую головку через две диафрагмы 2, степень раскрытия которых регулируется поворотом барабанов 1. Далее световые пучки A' и B' объединяются с помощью

объективов 3 и ромбических призм 4 и попадают на бипризму 5, которая сводит два пучка к оси окуляра, причем часть правого пучка, попадая на левую половину бипризмы, создает яркость левой половины поля зрения, а другая часть его, попадающая на правую половину бипризмы, отклоняется в сторону и поглощается внутри прибора. Левый пучок проходит симметрично. Из бипризмы лучи проходят через один из одиннадцати светофильтров 6, помещенных в револьверном диске, и попадают через окуляр 7 в глаз наблюдателя. Окуляр имеет кольцо, с помощью которого производится установка на резкость линии раздела поля зрения. Наблюдатель видит поле зрения в форме круга, разделенного линией на две половины А и В, имеющие в общем случае различную яркость. Яркость правой части поля определяется световым потоком, проходящим через левую диафрагму, а

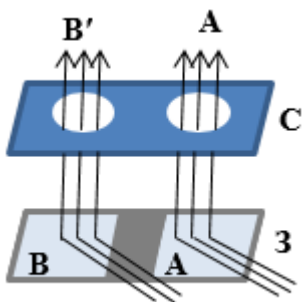


Рис. 2

левой – через правую. Если при равенстве яркостей обеих половин поля зрения на пути одного светового потока, например A' , поместить пластину из какого-либо вещества, поглощающего или отражающего свет, то фотометрическое равенство нарушится, так как поле А станет менее ярким (рис.1). Чтобы уравнивать поля, необходимо уменьшить яркость поля В путем уменьшения отверстия диафрагмы, через которую проходит световой поток B' . На измерительных барабанах 7 нанесены две шкалы – черная и красная.

Черная шкала показывает в процентах отношение площади отверстия диафрагмы S при данном ее раскрытии к площади S_0 при ее максимальном раскрытии. Так как световой поток Φ , проходящий через отверстие диафрагмы, пропорционален его площади, то отношение $S/S_0 = \Phi/\Phi_0$. Следовательно, показания черной шкалы барабана дают непосредственно коэффициент отражения ρ (1.10) или коэффициент пропускания τ (1.11) для исследуемого образца в процентах. Красная шкала на барабане в данной работе не используется.

Параллельные световые пучки A' и B' выходят из двух идентичных осветителей, отразившись от зеркала 3 или от поверхностей пластин А и В (рис.2) попадают в фотометрическую головку (рис.1). При определении коэффициента отражения пластина исследуемого материала А и эталонная В размещаются на поверхности зеркала, а при определении коэффициента пропускания – на

предметном столике С (рис.2). Точность измерений коэффициентов отражения и пропускания зависит от предварительной тщательной настройки фотометра.

Следует иметь в виду, что величины коэффициентов отражения, пропускания и поглощения зависят от угла падения света. Так, например, при нормальном падении света на поверхность прозрачного вещества с показателем преломления n коэффициент отражения минимальный и определяется формулой:

$$\rho_0 = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2. \quad (1)$$

Выполнение работы

Задание 1. *Определение коэффициента отражения прозрачной пластинки*

1. Закрывать зеркало З черной бумагой и поместить на его поверхности две одинаковые пластины из плексигласа или стекла (рис.2). 2. Включить фотометр и произвести его настройку (инструкция приведена на рабочем месте).

3. Заменить пластину А на исследуемую такой же толщины, а с помощью револьверного диска установить белый свет.

4. С помощью левого барабана выровнять в поле зрения яркости обеих половин (рис.1) и произвести измерение коэффициента отражения. Опыт повторить 3–5 раз.

5. Определите среднее значение коэффициента отражения в белом свете и оцените погрешности измерений.

6. Заменить пластину А на цветную (красную или зеленую или синюю) такой же толщины, а с помощью револьверного диска установить соответствующий светофильтр (№9, №10 или №11).

7. С помощью левого барабана выровнять в поле зрения яркости обеих половин (рис.1) и произвести измерение коэффициента отражения. Опыт повторить 3–5 раз.

8. Определите среднее значение коэффициента отражения в выбранном свете и оцените погрешности измерений.

9. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 1.

Таблица 1

№, п/п	Образец	ρ , %	$\Delta\rho$, %	ε , %	Образец	ρ , %	$\Delta\rho$, %	ε , %
1	Бесцветный				Цветной			
2								
3								
:								
Ср.								

10. По формуле (1) вычислить минимальный коэффициент отражения ρ_0 . По выполненному заданию сделать вывод.

Задание 2. *Определение коэффициента пропускания прозрачной пластинки*

1. Установить две одинаковые пластины из плексигласа или стекла (А и В) на предметный столик С (рис.2). Снять с зеркала черную бумагу.

2. Включить фотометр и произвести его настройку (инструкция приведена на рабочем месте).

3. Заменить пластину А на исследуемую такой же толщины, а с помощью револьверного диска установить белый свет.

4. С помощью левого барабана выровнять в поле зрения яркости обеих половин (рис.1) и произвести измерение коэффициента пропускания. Опыт повторить 3–5 раз.

5. Определите среднее значение коэффициента пропускания в белом свете и оцените погрешности измерений.

6. Учитывая значение ρ_0 , вычисленное в п. 10 задания 1, по формуле (1.12) вычислите коэффициент поглощение α . Оцените абсолютную и относительную погрешности.

7. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 2.

Таблица 2

№, п/п	Образец	τ , %	$\Delta\tau$, %	ε_τ , %	ρ_0 , %	$\Delta\rho_0$, %	ε_ρ , %	α , %	$\Delta\alpha$, %	ε_α , %
1	Бесцветный									
2										
3										
:										
Ср.										

Задание 3. *Определение коэффициента пропускания цветных пластинок*

1. Вместо пластины А установите на предметном столике С прозрачную цветную (красную, зеленую или синюю) пластину такой же толщины, что и пластина В.

2. С помощью револьверного диска последовательно устанавливайте светофильтры с №1 по №8 и измеряйте по левому барабану коэффициенты пропускания.

3. Повторите п. 2 для двух других цветных пластин.

4. Результаты измерений занесите в табл. 3.

Таблица 3

№ фильтра	1	2	3	4	5	6	7	8
λ , нм								
τ , %	726	665	619	574	533	496	465	432
Цвет								
Красный								
Зеленый								
Красный								

5. Построить графики зависимости коэффициента пропускания от длины волны $\tau=f(\lambda)$ для всех цветных пластин.

6. По выполненной работе сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие физические величины можно измерять фотометром?
2. Какой принцип положен в основу устройства фотометра?
3. Приведите оптическую схему фотометрической головки и объясните принцип ее работы.
4. Как с помощью фотометра ФМ-56 определяют коэффициенты отражения, пропускания и поглощения?
5. Какие существуют отражающие поверхности?
6. Что называется коэффициентом отражения, пропускания, поглощения? Как они взаимосвязаны между собой?
7. Приведите устройство фотометра ФМ-56 и алгоритм его настройки.

Литература

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М: Знак. 2006.
2. Мешков В.В. Основы светотехники / В.В. Мешков. – М: Энергия. 1979.
3. Гуревич М.М. Фотометрия / М.М. Гуревич. – Л: Энергоатомиздат, 1983. стр.191, 192.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. / Д.В. Сивухин. – Наука 1980, гл. IV, стр. 292-298.