

## Лабораторная работа

# ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ФОТОМЕТРОВ ФЭК–56ПМ И ФМ–56

### Цель работы:

Изучение законов поглощения света в твердых веществах и растворах с помощью универсального фотометра типа ФМ–56 и фотоэлектроколориметра ФЭК–56ПМ.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Законы поглощения света

При распространении электромагнитных волн и, в частности, световых в любой среде наблюдается более или менее значительное уменьшение их интенсивности<sup>1</sup>. Это связано с различными процессами, происходящими при взаимодействии электрического и магнитного полей волны с атомами и молекулами среды. Такими процессами могут быть, например, рассеяние, люминисценция, фотохимическое разложение вещества и др. Если прохождение света через некоторую среду не вызывает необратимых изменений, то есть не происходят фотохимические реакции, и вещество достаточно однородно, так что можно пренебречь рассеянием, то изменение интенсивности света обусловлено превращением энергии электромагнитного поля волны в другие виды энергии (чаще всего в энергию хаотического теплового движения атомов и молекул вещества) и называется поглощением света.

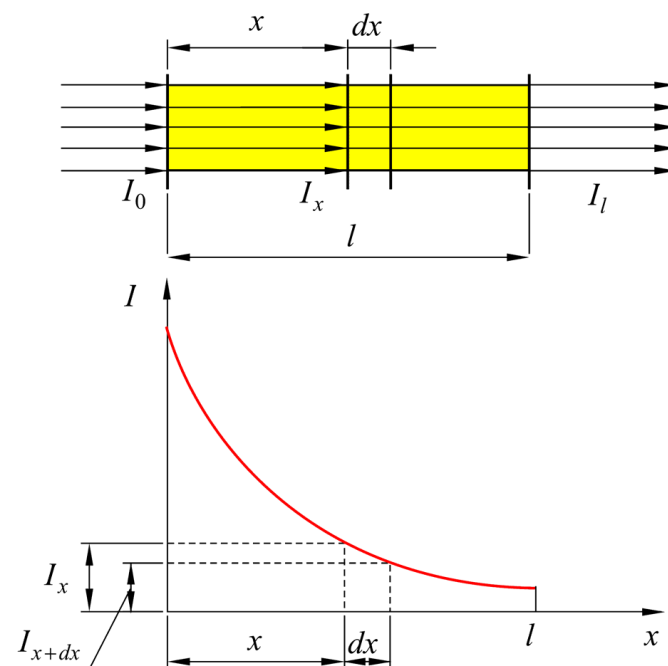
Современная теория поглощения света основывается на общих положениях молекулярной оптики и квантовой механики. Однако и классическая электронная теория в какой-то мере объяснила это явление и позволила вывести основные его законы. Электромагнитная теория Максвелла, развитая далее Лорентцом, связала между собой оптические и электрические свойства тел. Она объяснила, в частности, почему диэлектрики прозрачны, а металлы совсем не пропускают свет: в диэлектриках практически нет свободных электронов и проходящая световая волна может возбудить лишь колебания электронов, связанных в атомах, при этом она расходует очень мало своей энергии.

---

<sup>1</sup> Здесь под интенсивностью подразумевается среднее значение плотности потока световой энергии.

Возникновение электронных представлений дало возможность детально изучить взаимодействие световой волны и вещества. Это взаимодействие сводится к возбуждению колебаний электронов, входящих в состав атомов и молекул диэлектрика. В простейшем случае можно предположить, что вещество состоит из одинаковых атомов, и в каждом из них под действием поля волны может смещаться только один электрон. Обычно этот электрон находится в состоянии равновесия, удерживаемый некоторой силой. Эта сила должна иметь характер упругой силы, поскольку изолированные атомы всех веществ испускают почти монохроматический свет, что соответствует колебанию электрона по гармоническому закону под действием упругой силы. Когда же в веществе распространяется электромагнитная волна, то ее поле действует на электроны в атомах. На покоящийся или медленно движущийся электрон магнитная составляющая этого поля оказывает очень малое влияние, и во всех практически случаях можно учитывать лишь действие электрического поля волны. Со стороны электромагнитного поля на электрон будет действовать переменная сила, которая заставит его совершать колебательное движение.

Так как электрон стремится к положению равновесия, то возбуждающее его колебания поле расходует определенную часть энергии, и эти потери будут тем больше, чем ближе частота электрического поля волны к собственной частоте колебаний электрона.



**Рис.1. Изменение интенсивности параллельного пучка света в плоском слое изотропного однородного вещества**

Основной закон поглощения света в однородном материале может быть выведен независимо от модельных представлений о деталях взаимодействия света с веществом на основе энергетических соображений. Пусть параллельный пучок монохроматического излучения с частотой  $\nu$  и начальной интенсивностью  $I_0$  нормально падает на плоский слой изотропного однородного вещества толщиной  $l$  (рис.1). Мысленно разделим весь слой вещества на элементарные слои толщиной  $dx$ , которые будем считать физически бесконечно узкими, так, что изменение интенсивности световой волны  $dI_x$  за счет поглощения в таком малом слое мало по сравнению с самой интенсивностью  $I_x$ . В 1729 году французский физик Пьер Бугер

установил, что относительное изменение интенсивности света  $dI_x/I_x$  в каждом таком слое  $dx$  не зависит от интенсивности и пропорционально толщине этого слоя:

$$\frac{dI_x}{I_x} = -k_v dx, \quad (1)$$

здесь  $k_v$  – коэффициент пропорциональности, а минус соответствует уменьшению интенсивности.

Для вычисления полного поглощения света в слое вещества конечной толщины  $l$  следует это выражение проинтегрировать, взяв в левой части пределы от  $I_0$  до  $I_l$ , а в правой – от  $0$  до  $l$ , соответственно:

$$\int_{I_0}^{I_l} \frac{dI_x}{I_x} = - \int_0^l k_v dx. \quad (2)$$

В результате получаем:

$$\ln \frac{I_l}{I_0} = -k_v l,$$

или

$$I_l = I_0 e^{-k_v l}. \quad (3)$$

Выражение (3) называется законом Бугера, где величина  $k_v$  – коэффициент поглощения. Коэффициент поглощения вещества имеет размерность  $[L^{-1}]$  (в системе СИ коэффициент поглощения измеряется в  $m^{-1}$ ) и характеризует такую толщину слоя любого вещества, которая ослабляет интенсивность проходящего через нее монохроматического излучения в  $e$  раз. Эта величина характеризуется сильной и специфической для каждого вещества зависимостью от частоты света. Зависимость коэффициента поглощения от частоты определяет спектр поглощения данного вещества и часто имеет очень сложный вид.

Начальная  $I_0$  и конечная  $I_l$  интенсивности в выражении (3) должны быть измерены с учетом отражения света от границ слоя вещества. Так как величина отраженной части энергии не зависит от толщины слоя<sup>1</sup>, то при достаточно толстых слоях часто бывает возможно пренебречь отражением по сравнению с поглощением излучения.

Тщательную экспериментальную проверку справедливости предположения, лежащего в основе закона Бугера, произвел академик С.И.Вавилов. Оказалось, что закон выполняется при любых интенсивностях от порога зрительного ощущения человеческого глаза (порядка  $10^{-14}$  Вт/м<sup>2</sup>) до величины в  $10^{19}$  раз большей. Этот закон был экспериментально установлен Бугером для поглощения видимого света, но ему подчиняется ослабление потока энергии, который несет однородная радиация любого вида. В связи с этим С.И.Вавилов так оценил роль Бугера в развитии оптики: “Во всяком случае, имя Бугера в истории оптики должно стоять наряду с именами Ньютона и Гюйгенса...Закон Бугера является, таким образом, одним из самых точных законов природы”.

<sup>1</sup> Здесь не учитывается возможный эффект интерференции световых волн, отраженных от первой и второй границ слоя, который в зависимости от разности фаз волн (в зависимости от оптической толщины слоя) может приводить или к увеличению, или к уменьшению энергии отраженной от слоя энергии.

Дальнейшее развитие представлений о закономерностях поглощения света связано с работами А.Беера, предположившего в 1852 году, что поглощение света тонким слоем однородной среды пропорционально числу содержащихся в нем молекул, а следовательно, числу их в единице объема среды, то есть их концентрации. В случае слабых растворов при непоглощающем растворителе коэффициент поглощения пропорционален концентрации (закон Беера):

$$k_v = \chi_v C, \quad (4)$$

где  $C$  – концентрация, а  $\chi_v$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты света и от свойств молекул растворенного вещества.

Закон Беера имеет гораздо более узкие границы применимости, чем закон Бугера, так как наблюдаются многочисленные отступления от него, особенно при больших концентрациях, а кроме того, часто коэффициент  $k_v$  зависит от природы растворителя. При небольших концентрациях взаимодействие молекул в растворе мало и закон Беера обычно выполняется. Для растворов, подчиняющихся закону Беера, математическая формулировка закона Бугера принимает вид<sup>1</sup>

$$I_{lv} = I_{0v} \exp(-\chi_v Cl). \quad (5)$$

При этом появляется возможность определения концентрации поглощающего вещества с помощью измерения поглощения света в растворе. Этот прием нередко используется в лабораторной и производственной практике для быстрого измерения концентрации веществ, химический анализ которых оказывается очень сложным или требует много времени.

### Фотометрические величины

Основной энергетической характеристикой излучения является плотность лучистого потока, то есть поток энергии, проходящий в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярно направлению излучения.

В системе СИ плотность потока излучения измеряется в Ваттах на квадратный метр, а в системе СГС – в эргах в секунду на квадратный сантиметр:  $1 \text{ Вт/м}^2 = 10^3 \text{ эрг/(с}\cdot\text{см}^2)$ .

Отношение интенсивности прошедшего через тело светового потока к интенсивности потока, падающего на него, называется коэффициентом пропускания:

$$T = \frac{I_l}{I_0}. \quad (6)$$

Логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания, называется оптической плотностью:

$$D = \lg \frac{1}{T} = \lg \frac{I_0}{I_l}. \quad (7)$$

Очевидно, что и коэффициент пропускания и оптическая плотность есть величины безразмерные. Легко найти связь между коэффициентом поглощения  $k_v$  и коэффициентом пропускания:

<sup>1</sup> Этот закон часто называют законом Ламберта-Бугера-Беера. Ламберт в 1760 году независимо от Бугера получил и исследовал закон поглощения света.

$$k_v = -\frac{1}{l} \ln T \text{ или } k_v = -\frac{\lg T}{l \lg e}, \quad (8)$$

а также между коэффициентом поглощения и оптической плотностью:

$$k_v = \frac{D}{l \lg e} = \frac{D}{0,43l} = 2,3 \frac{D}{l}. \quad (9)$$

Оптическая плотность – особенно удобная характеристика при количественном молекулярном анализе, так как оптическая плотность смешанного раствора равна сумме оптических плотностей всех компонент при отсутствии взаимодействия между компонентами.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приборы для измерения коэффициента пропускания и оптической плотности в зависимости от приемника излучения разделяются на субъективные и объективные. При субъективном, или визуальном, методе приемником излучения служит глаз. Этот метод называется так потому, что результат измерения в некоторой степени зависит от субъективных особенностей глаза наблюдателя. Объективный метод основан на использовании одного из физических приемников излучения (фотоэлемент, термоэлемент, болометр, фотопластинка и др.).

В данной работе необходимо измерить либо оптическую плотность окрашенной пластинки из органического стекла в нескольких спектральных интервалах видимой области спектра с помощью визуального прибора – универсального фотометра ФМ-56, либо оптическую плотность и концентрацию раствора на фотоэлектроколориметре типа ФЭК-56ПМ.

### Универсальный фотометр ФМ-56

С помощью универсального фотометра измеряются коэффициенты пропускания для жидких и твердых прозрачных (нерассеивающих) сред и выполняется целый ряд иных световых измерений.

Схема этого прибора, предложенная Пульфрихом, выдержала испытание временем и в различных модификациях применяется в ряде фотометрических приборов.

Человеческий глаз очень хорошо чувствует контраст, то есть различие (даже небольшое) яркостей двух смежных поверхностей, освещенных двумя источниками света, имеющими одинаковое распределение энергии излучения по частотам и отличающимися по мощности. Эта особенность глаза используется в описываемом приборе.

Оптическая схема и внешний вид универсального фотометра ФМ-56 приведена на рис.2.

Источником света в приборе служит специальная лампа накаливания 10 (рис.2). Свет от нее с помощью плоских зеркал 9 разделяется на два пучка и заполняет два конденсора 8, фокальные плоскости которых проходят через спираль лампы. Поэтому после конденсоров свет идет двумя практически параллельными пучками. Далее эти пучки, пройдя каждый через свою регулируемую диафрагму 6, попадает на объективы 5. Каждый из объективов дает действительное изображение спирали лампы на соответствующих гранях бипризмы Френеля 3. Ребро тупого угла бипризмы создает линию раздела двух соприкасающихся полей сравнения, на которую наводится глаз

наблюдателя с помощью окуляра 1. Схема прохождения световых пучков через бипризму показана на рис.3.

Для повышения точности фотометрирования и для снятия спектральной зависимости коэффициентов поглощения исследуемых образцов прибор оснащен набором светофильтров 2, легко сменяемых поворотом специального револьверного диска в верхней части прибора.

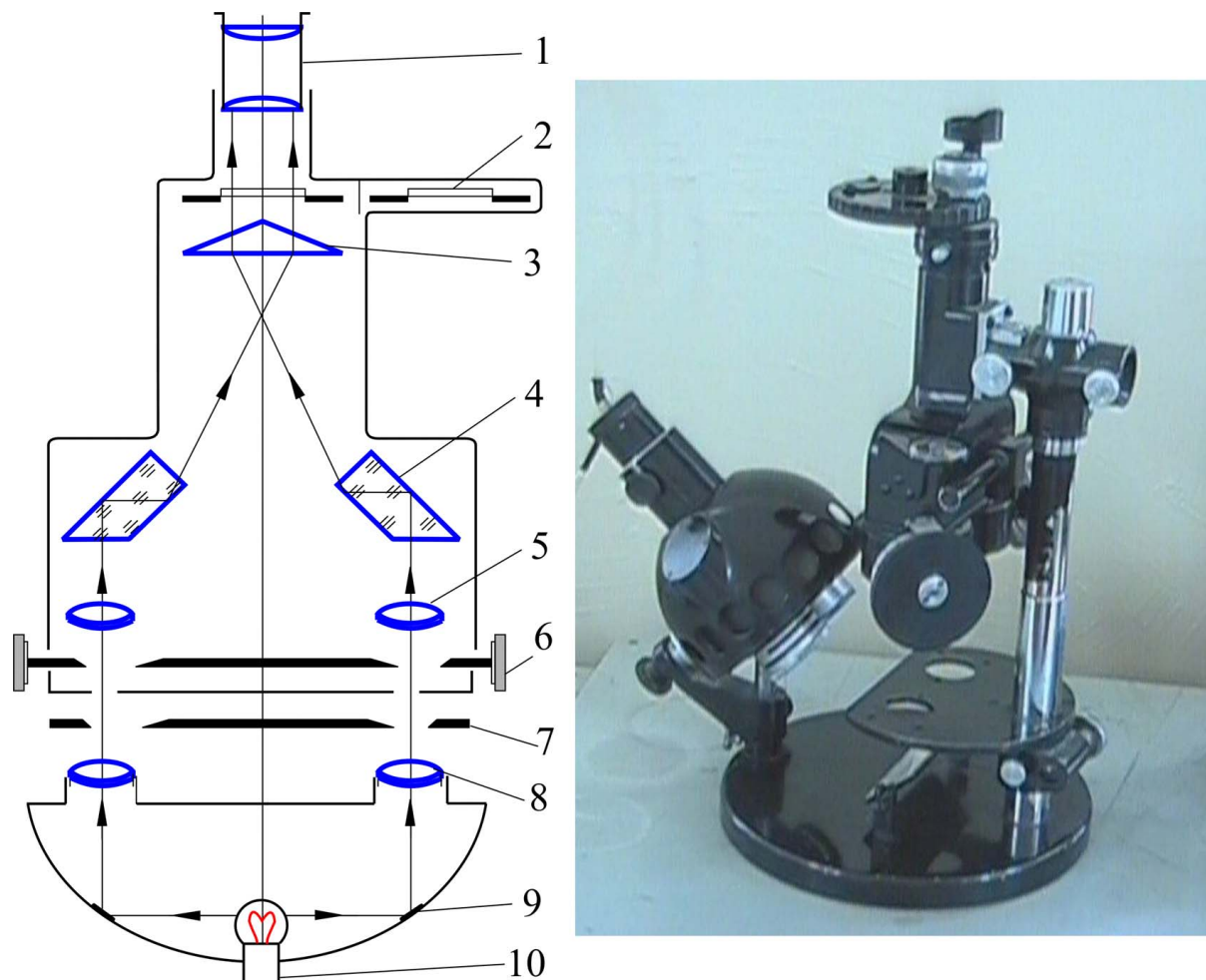


Рис.2. Оптическая схема и внешний вид универсального фотометра ФМ-56

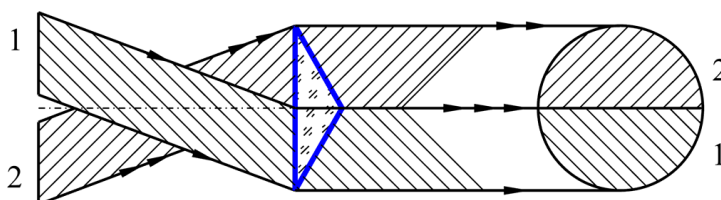


Рис.3. Схема прохождения световых пучков через бипризму Френеля

На оправе конденсоров имеются гнезда для установки матовых рассеивателей: создающих равномерные световые поля сравнения. Яркость видимой в окуляр левой части поля сравнения регулируется правой диафрагмой 6: а яркость правой части поля – левой диафрагмой 6. Конструктивно эти диафрагмы состоят из двух металлических пластин с прямоугольными вырезами. При вращении барабанов 6 (рис.2) пластины диафрагм симметрично сходятся или расходятся.

На каждом барабане нанесено по две шкалы с красной и черной гравировкой. Черная шкала – шкала коэффициентов пропускания – проградуирована от 0 до 100% так, что числа непосредственно пропорциональны интенсивностям проходящих световых потоков. Красная шкала проградуирована в единицах оптической плотности. Отношение величин световых потоков, прошедших через диафрагмы, равно отношению площадей этих диафрагм.

### **Подготовка фотометра к работе**

Один из штекеров шнура прибора вставить в гнездо “0”, а другой – в гнездо “8” прилагаемого к прибору трансформатора, что соответствует выходному напряжению в 8 В, на которое рассчитана лампа фотометра. На крышке трансформатора установлен выключатель для включения и выключения прибора без отсоединения трансформатора от сети 220 В. С помощью реостата, ручка которого находится на крышке трансформатора, можно регулировать величину тока накала нити лампы.

Поворотом револьверного диска включить зеленый светофильтр №5 (в окошечке на верхней крышке диска видна цифра 5). Сфокусировать окуляр на линию раздела полей сравнения и если изображения спирали, видимые в каждой половине поля зрения, нерезки, то следует добиться резкости, передвигая конденсоры 8. После этого в пазы оправ конденсоров вставляют матовые рассеиватели. На этом предварительную установку фотометра можно считать законченной и прибором можно пользоваться. Однако для облегчения измерений полезно уравнивать световые потоки, попадающие в фотометрическую головку. Посылаемые осветителем в прибор световые потоки равны, если при одинаковых отсчетах на двух барабанах прибора яркости обеих половин поля зрения одинаковы (так называемое среднее положение фотометрического равновесия). Если этого нет, то можно уравнивать поток, пользуясь следующими правилами:

- а) вставить в паз оправы одного из конденсоров прозрачное стекло: прилагаемое к прибору;
- б) поменять местами рассеиватели;
- в) слегка переместить один или оба конденсора в осветителе.

Вызываемая этим дефокусировка нити лампы не имеет значения для работы с прибором.

Последний прием является весьма чувствительным и позволяет добиться уравнивания потоков с большой точностью. Уравнивание можно считать удовлетворительным, если при установке одного из барабанов на отсчет 50 по шкале светопропускания среднее положение фотометрического равновесия будет соответствовать отсчету по шкале светопропускания второго барабана в пределах 49,5-50,5. Установленное положение осветителя, а также положение плоского зеркала в процессе измерения не должно нарушаться.

## Измерение коэффициентов пропускания прозрачных образцов

Измерения проводят следующими тремя способами:

1. Правый барабан устанавливают на деление 100 по черной шкале. С помощью левого барабана уравниваются яркости в поле зрения. Над левым отверстием предметного столика помещают образец, при этом правая половина поля зрения темнеет. Вращая п р а в ы й измерительный барабан, добиваются равенства яркостей обеих половин поля зрения и берут отсчет по черной шкале п р а в о г о барабана. Установку на равенство следует произвести несколько раз и из полученных отсчетов определить среднее арифметическое, которое и будет представлять искомое значение коэффициента пропускания образца в процентах.

2. Правый барабан устанавливают на деление 100 по черной шкале. Исследуемый образец помещают в правый пучок света. Яркости половин поля зрения уравнивают с помощью л е в о г о барабана. После этого образец вынимают и восстанавливают нарушенное фотометрическое равновесие вращением п р а в о г о барабана. Средний отсчет из нескольких делений, взятых по черной шкале этого барабана, дает коэффициент пропускания данного образца.

3. Правый барабан устанавливают на деление 100 по черной шкале. Исследуемый образец помещают в правый пучок света и уравнивают фотометрические поля вращением л е в о г о барабана. Берут несколько отсчетов и определяют из них среднее значение пропускания. Затем перекалывают образец из правого пучка в левый и повторяют измерения, причем теперь левый барабан устанавливают на цифре 100. Отсчеты, соответствующие фотометрическому равновесию, берут в этом случае по п р а в о м у барабану.

Далее находят искомый коэффициент пропускания:

$$T = \sqrt{T_1 T_2} . \quad (10)$$

Если же пользоваться шкалой оптических плотностей, то по формуле

$$D = \frac{1}{2}(D_1 + D_2) \quad (11)$$

определяют среднее значение оптической плотности.

### Задача

Измерить пропускание и оптическую плотность приложенного образца всеми тремя методами для каждого из восьми узкополосных светофильтров (с 1 до 8) и графически построить зависимость оптической плотности и коэффициента пропускания от длины волны света, то есть спектральную характеристику образца.

Длины волн, пропускаемых светофильтрами, даны в табл.1.

Таблица 1

Номер светофильтра	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина волны, нм	726	665	619	574	533	496	465	436

## Фотоэлектрический колориметр ФЭК-56ПМ

В данной работе используется фотоэлектрический колориметр типа ФЭК-56ПМ, на котором производят измерения интенсивностей световых потоков с помощью фотоэлементов. Благодаря этому исключаются субъективные ошибки, обусловленные



индивидуальными особенностями глаз различных наблюдателей и имеющие место при работе на визуальных приборах.

Целью работы является исследование зависимости коэффициента пропускания и оптической плотности от длины волны для раствора известной концентрации и определение неизвестной концентрации по результатам измерений оптической плотности.

### Описание и принцип действия прибора ФЭК-56ПМ

Оптическая схема прибора приведена на рис.4,а, а внешний вид - на рис. 4,б. Световой пучок от источника света 1, пройдя через светофильтр 2, попадает на призму 3, которая делит пучок на два: левый и правый. Так как источник света помещен в фокусе линз 4, то свет, пройдя через линзы и отразившись от зеркал 5, выходит параллельными пучками. Далее пучки идут через кюветы 6 и попадают на линзы 8, в фокальных плоскостях которых помещены матовые стекла 9, а за ними сурьмяно-цезиевые фотоэлементы 10. В правый световой пучок могут помещаться последовательно кюветы с раствором и растворителем. Раздвижная диафрагма 7, расположенная в правом пучке света, при вращении связанного с ней правого барабана, меняет свою площадь и тем самым меняет величину светового потока, падающего на правый фотоэлемент.

Раздвижная диафрагма 11 расположена в левом пучке и служит для ослабления светового потока, падающего на левый фотоэлемент 10. Величина фототока пропорциональна величине светового потока, падающего на фотоэлемент. В приборе используется компенсационный метод, основанный на уравнивании световых потоков в правом и левом "плечах" прибора.

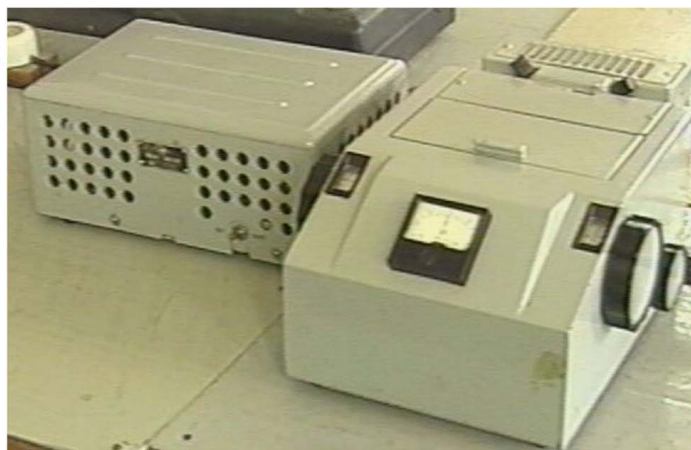
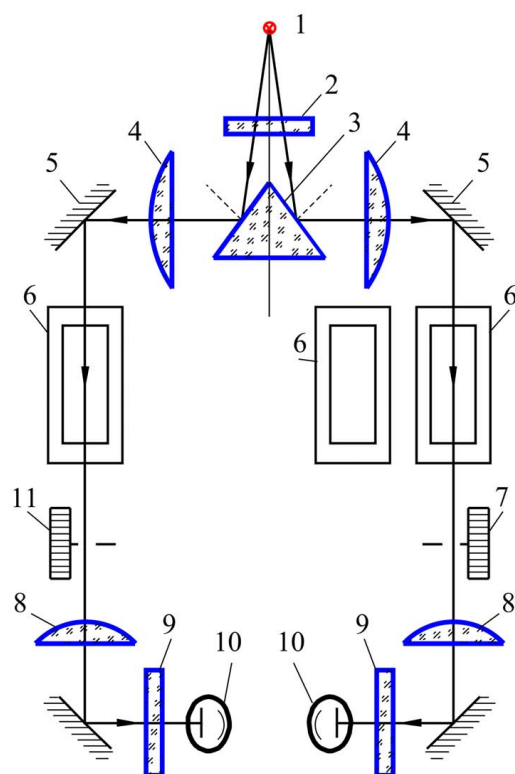


Рис.4. Оптическая схема и внешний вид фотоэлектрического колориметра ФЭК-56ПМ

Правый световой пучок является измерительным: а левый – компенсационным.

Если интенсивность, то есть плотность светового потока, измерительного пучка уменьшилась в “ $n$ ” раз за счет поглощения света в исследуемом веществе, то для уравнивания световых потоков необходимо увеличить площадь диафрагмы в компенсационном пучке в такое же число раз.

Измерение коэффициента пропускания  $T$  основано на определении отношения световых потоков – полного  $\Phi_0$  и пропущенного через исследуемую среду  $\Phi$ :

$$T = \frac{\Phi}{\Phi_0} \cdot 100\%.$$

В левый световой пучок на все время измерений помещают кювету с растворителем. Диафрагма левого плеча должна быть открыта. В правый световой пучок помещают такую же кювету с исследуемым раствором. Раздвижная диафрагма правого плеча полностью открыта (отсчет 100 по шкале коэффициента пропускания), что соответствует световому потоку  $\Phi_0$ .

Вследствие поглощения или рассеяния света раствором на правый фотоэлемент будет падать световой поток меньшей интенсивности, чем на левый фотоэлемент, и стрелка микроамперметра, который включен в диагональ моста балансного усилителя постоянного тока, будет отклоняться от нулевого положения. Вращая барабан левой раздвижной диафрагмы, уравнивают величину обоих световых потоков, при этом стрелка микроамперметра устанавливается на “0” (баланс схемы).

Затем кювета с раствором в правом плече заменяется такой же кюветой с растворителем. При этом фотометрическое равновесие вновь нарушается. Вращая правый барабан, уменьшают величину правого светового потока до первоначальной, при этом стрелка микроамперметра опять должна быть на “0”. Полученные по шкале правого барабана отсчеты будут соответствовать потоку  $\Phi$ . Эти отсчеты дают нам коэффициент пропускания в процентах и величину оптической плотности исследуемого раствора.

## Порядок выполнения работы

Для выполнения работы взять у лаборанта три раствора медного купороса в воде с известными концентрациями и один раствор неизвестной концентрации, а также три одинаковых кюветы: две из которых заполнить дистиллированной водой. Третья кювета последовательно заполняется растворами в соответствии с заданиями.

### Задание 1.

Исследовать зависимости коэффициента пропускания и оптической плотности раствора медного купороса в воде от длины волны проходящего через раствор излучения.

В комплект прибора ФЭК-56ПМ входит блок питания и собственно электрический колориметр.

1. Проверить, чтобы на блоке питания тумблер “СЦ-98”-“СВД-120А” находился в положении “СЦ-98”.
2. Перекрыть шторками световые пучки, поставив ручку «откр.» на верхней части колориметра в крайнее правое положение.
3. Включить блок питания прибора в сеть ~220 В и дать прибору прогреться в течение 30 мин.
4. Установить «Электрический нуль» прибора. Для этого ручкой «нуль», находящейся на боковой панели прибора, установить стрелку микроамперметра на «0».
5. Ручку «чувств.» (на той же стороне прибора) поставить в среднее положение.

6. Установить измерительный (правый) и компенсационный (левый) большие барабаны в положение 100% пропускания (по черной шкале).

7. Открыть крышку кюветного отделения (на верхней части прибора). Установить в левый держатель кювету с растворителем, а в правые держатели кюветы с растворителем и раствором какой-либо концентрации (например, 7%).

8. Ввести в правый световой пучок кювету с раствором с помощью малого барабана на правой стороне прибора. Закрыть крышку кюветного отделения.

9. В световые пучки ввести фильтр «3» (малый барабан на левой боковой стенке прибора).

10. Открыть шторы колориметра. При этом стрелка микроамперметра отклонится из нулевого положения. Скомпенсировать это отклонение компенсационным (левым) барабаном.

11. Вывести поворотом малого барабана (на правой стороне прибора) в правое плечо кювету с растворителем. Отклонение стрелки скомпенсировать измерительным (правым) барабаном.

Снять показания для пропускания  $T$  (черная шкала) и оптической плотности  $D$  (красная шкала) по измерительному барабану.

12. Вернуть измерительный барабан в положение 100% пропускания: а в правое плечо ввести кювету с раствором.

13. Вводя последовательно в световые пучки фильтры «4» ÷ «8», провести аналогично измерения (п.п.9-12) для каждого фильтра.

14. По результатам измерений построить графики зависимостей  $T$  и  $D$  от длины волны (используя табл.2).

Таблица 2

Номер светофильтра	3	4	5	6	7	8
Длина волны, нм	400	440	490	540	582	597

### Задание 2.

Измерить оптические плотности 3-х растворов с известными концентрациями и одного раствора с неизвестной концентрацией. На основании этих измерений с помощью построения градуировочного графика определить неизвестную концентрацию раствора.

1. При закрытых шторах колориметра проверить установку нуля (см. п.4 задания).
2. Для работы выбрать фильтр, при котором измеренная оптическая плотность имеет значение  $0,3 \div 0,5$  и мало зависит от длины волны (см. график  $D$  от  $\lambda$  в задании 1). Ввести в световые пучки этот фильтр.
3. Последовательно устанавливая в правое плечо кювету с растворами известных концентраций и неизвестной концентрации, провести измерения оптической плотности  $D$  для каждого из растворов в соответствии с п.п. 10, 11 задания 1.
4. Построить градуировочный график зависимости оптической плотности  $D$  раствора от концентрации  $C$  %, по которому определить неизвестную концентрацию раствора.

После выполнения заданий выключить прибор и вернуть принадлежности лаборанту.

## Контрольные задания и вопросы

1. Сделайте вывод закона Бугера. Поясните физический смысл и границы применимости дифференциального и интегрального законов поглощения света.
2. Во сколько раз ослабляется поток света в слое вещества, если оптическая плотность равна  $D$ ?
3. Нарисуйте оптическую схему и объясните принцип действия прибора ФЭК-56ПМ (ФМ-56). Каким методом в приборе ФМ-56 поле зрения делится на две части?

## Литература

1. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. М.: Физматиз, 1961. Т.3.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
3. Пешкова В.М., Громова М.И. Практическое руководство по спектрофотометрии и колориметрии. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1961.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Электронная модель поглощения света

Переменное электрическое поле волны, распространяющейся в диэлектрике, приводит электроны в атомах к вынужденным колебаниям. В связи с этим дифференциальное уравнение колебаний каждого электрона, например, по оси  $x$  должно иметь вид

$$m\ddot{x} + m\gamma\dot{x} + m\omega_n^2x = eE_0 \cos\omega t, \quad (12)$$

где  $\gamma$  - коэффициент затухания колебаний;  $\omega = 2\pi\nu$ ,  $\nu$  - частота световой волны;  $\omega_n$  - собственная циклическая частота колебаний электрона в атоме.

Второе слагаемое в левой части уравнения определяет поглощение энергии световых волн, распространяющихся в среде.

Уравнение (12) можно преобразовать к виду

$$e\ddot{x} + \gamma e\dot{x} + \omega_n^2 ex = \frac{e^2}{m} E_0 \cos\omega t, \quad (13)$$

где  $ex = p_x$  - дипольный момент атома в направлении оси  $x$ .

Для простоты можно считать, что весь момент направлен по оси  $x$ , то есть

$$\ddot{p} + \gamma \dot{p} + \omega_n^2 p = \frac{e^2}{m} E_0 \cos\omega t. \quad (14)$$

Если в  $1 \text{ см}^3$  имеется  $N$  атомов, то дипольный момент  $P$  единицы объема по абсолютной величине равен  $P = pN$ . Умножая левые и правые части уравнения (14) на  $N$ , получаем

$$\ddot{P} + \gamma \dot{P} + \omega_n^2 P = N \frac{e^2}{m} E_0 \cos\omega t. \quad (15)$$

Для упрощения расчетов произведем вычисления в комплексной форме:  
 $E = \tilde{E}_0 e^{i\omega t}$ , где  $\tilde{E}_0 = E_0 e^{i\varphi}$  - комплексная амплитуда;  $E_0$  - вещественная амплитуда;  $\varphi$  - начальная фаза колебаний:

$$\ddot{P} + \gamma \dot{P} + \omega_n^2 P = N \frac{e^2}{m} \tilde{E}_0 e^{i\omega t}. \quad (16)$$

Решением этого уравнения является  $P = \tilde{P}_0 e^{i\omega t}$ , где  $\tilde{P}_0$  - амплитуда колебаний дипольного момента единицы объема.

Подставляя это решение в уравнение (16), найдем

$$\tilde{P}_0 = N \frac{e^2}{m} \frac{\tilde{E}_0}{\omega_n^2 - \omega^2 + i\omega\gamma}. \quad (17)$$

Так как между  $\tilde{P}$  и  $\tilde{E}$  существует соотношение

$$\tilde{P} = \frac{\tilde{\varepsilon} - 1}{4\pi} \tilde{E} = \frac{\tilde{n}^2 - 1}{4\pi} \tilde{E}, \quad (18)$$

где  $\tilde{\varepsilon}$  и  $\tilde{n}$  - диэлектрическая проницаемость и показатель преломления (в данном случае эти величины комплексные), то для соответствующих амплитудных значений справедливо выражение

$$\tilde{P}_0 = \frac{\tilde{n}^2 - 1}{4\pi} \tilde{E}_0. \quad (19)$$

Сравнивая (17) и (19), получим:

$$\tilde{n}^2 - 1 = \frac{4\pi N \frac{e^2}{m}}{\omega_n^2 - \omega^2 + i\omega\gamma}. \quad (20)$$

Комплексный показатель преломления можно представить в виде

$$\tilde{n} = n - i\chi. \quad (21)$$

После прохождения волной слоя толщиной  $l$  ее уравнение приобретает следующий вид:

$$E = \tilde{E}_0 \exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda} \chi l\right] \exp\left(i \frac{2\pi}{T} \left[t - \frac{nl}{c}\right]\right), \quad (22)$$

где  $\lambda = cT$  - длина волны светового колебания в вакууме.

Если теперь подставить  $\tilde{n}$  из (21) в (20), то, отделив действительную часть от мнимой, получим:

$$n^2 - \chi^2 - 1 = \frac{4\pi N \frac{e^2}{m} (\omega_n^2 - \omega^2)}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}, \quad (23)$$

$$\frac{\lambda}{4\pi} k_v = \chi = \frac{2\pi N \frac{e^2}{m} \gamma \omega}{n \left[ (\omega_n^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2 \right]}. \quad (24)$$

---

Здесь  $k_\nu$  - коэффициент поглощения (см. формулу (1)), а величина  $\chi$  характеризует уменьшение амплитуды световой волны (22) по мере ее распространения в поглощающем веществе.

Изложенный расчет справедлив для разреженных газов, когда практически отсутствует взаимодействие между атомами или молекулами.