

БЕЛОРУССКИЙ ИНСТИТУТ МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
С.И.ДОБРОВОЛЬСКИЙ, Э.Я.КРУШНИК, В.А.КИРДУН, И.В.ТУРИК

РУКОВОДСТВО  
к лабораторным работам по физике

Часть III  
Оптика и атомная физика

Под редакцией С.И.Добровольского

Минск 1968

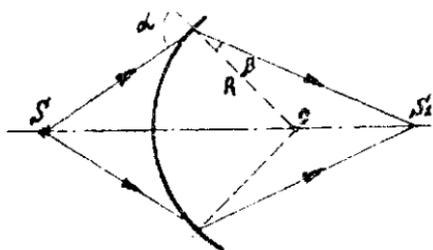


Рис. I а

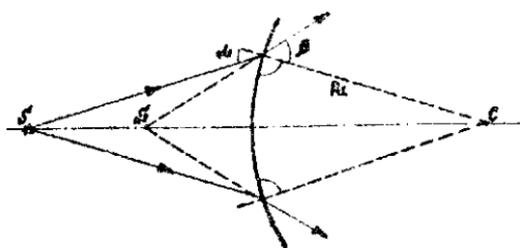


Рис. I б

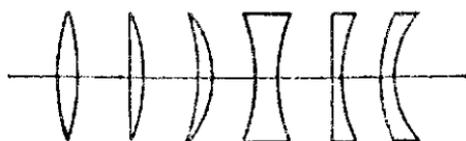


Рис. 2

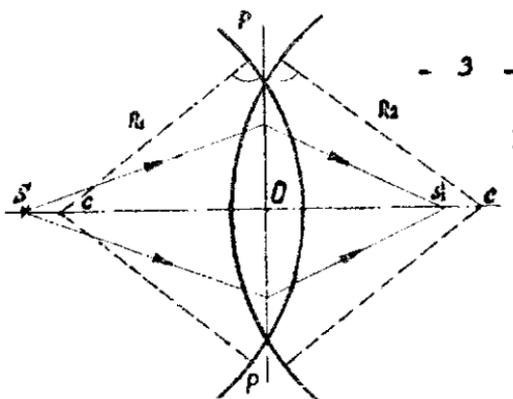


Рис. 3

При построении изображения тонкая линза условно может быть заменена плоскостью, перпендикулярной оптической оси  $/ P, P' /$ . Предполагается, что точки пересечения поверхностей линзы с оптической осью и оптический центр совпадают/. При построении изображений направление луча, пересекающего эту плоскость, изменяют на столько, на сколько это имеет место при прохождении луча через линзу /рис.3/.

При удалении источника света  $S$  от линзы смещается и положение его изображения  $S_1$ .

Положение изображения источника света, удаленного в бесконечность, называется главным фокусом линзы. Расстояние от фокуса линзы до ее оптического центра называется главным фокусным расстоянием  $F$ , а плоскость, проходящая через фокус перпендикулярно к главной оптической оси, называется главной фокальной плоскостью.

Величина, обратная фокусному расстоянию  $\frac{1}{F}$ , называется оптической силой линзы и измеряется в диоптриях, если  $F$  измеряется метрах. Оптическая сила собирающей линзы положительна, рассеивающей -- отрицательна. Оптическая сила системы из двух соприкасающихся линз равна сумме их оптических сил:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2}. \quad /1/$$

Для тонких линз справедлива также следующая зависимость:

$$\frac{1}{F} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad /2/$$

где:  $n$  - относительный показатель преломления материала линзы.

$R_1$  и  $R_2$  - радиусы кривизны обеих поверхностей линзы.

Знак  $\times R$  берется положительным, если выпуклость поверхности обращена к менее плотной среде. Оптическую силу можно определить и из следующей зависимости:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad /3/$$

где:  $d$  - расстояние от предмета до оптического центра линзы.

$f$  - расстояние от изображения предмета до оптического центра линзы.

## § 2. Вывод рабочей формулы

Согласно соотношению /3/ фокусное расстояние линзы можно найти, измерив расстояние  $d$  и  $f$ , по формуле:

$$F = \frac{d \cdot f}{d + f} \quad /4/$$

Положение оптического центра линзы в этом опыте не может быть точно определено, поэтому  $d$  и  $f$  могут быть измерены лишь приблизительно, а значит и  $F$  будет определено с большой погрешностью. Однако, можно определять  $F$ , не делая непосредственных измерений  $d$  и  $f$ .

Действительно, величины  $d$  и  $f$  входят в формулу /4/ симметрично, поэтому источник света и его изображение могут поменяться ролями. Если предмет поместить на расстоянии  $f$  от линзы, то его изображение получится на расстоянии  $d$  от линзы и наоборот.

Следовательно, при размещении линзы между экраном и источником света, при условии, если расстояние от предмета **AB** до экрана, где получается изображение, больше  $4F$ , то найдутся два таких положения линзы, при которых на экране будет наблюдаться отчетливое изображение предмета: в одном случае увеличенное, а в другом уменьшенное /рис.5, положение I и II/.

Обозначим расстояние, на которое пришлось при этом передвинуть линзу по оптической скамье через  $z$  / $z$ - величина перемещения оптического центра линзы, может быть измерена достаточно точно, ибо для этого нужно измерить перемещение какой-либо отметки на штативе с линзой/. Из рис.4 видно, что расстояние  $z$  между предметом **AB** и экраном будет равно:

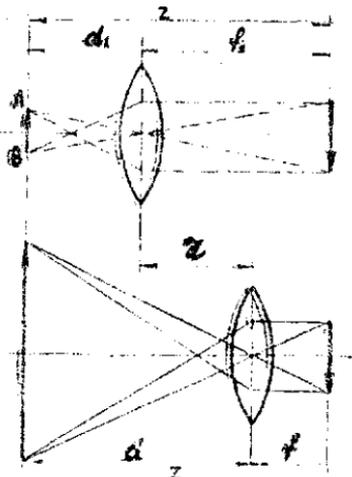


Рис. 4

$$z = d + f. \quad /5/$$

Перемещение линзы  $z = d - d_2$   
 по так как  $d_2 = f$ , то

$$d = z + f. \quad \text{Учитывая,}$$

$$\text{что } d = z - f \quad \text{получим}$$

$$z - f = z + f \quad \text{откуда}$$

$$f = \frac{z+z}{2}. \quad /6/$$

$$\text{Аналогично, т.к. } f = d - z$$

$$d = \frac{z+z}{2}. \quad (2)$$

Подставляя полученные выражения для  $f$  и  $d$  в формулу /4/, найдем искомое фокусное расстояние собирающей линзы:

$$F = \frac{(z+z)(z-z)}{4z}. \quad /8/$$

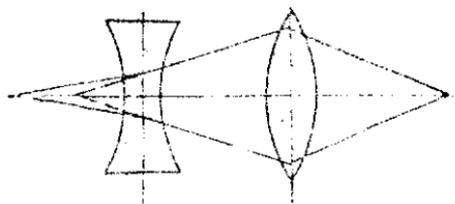


Рис. 5.

Фокусное расстояние рассеивающей линзы этим способом определить нельзя, так как она не дает действительного изображения.

Для измерения фокусного расстояния рассеивающей линзы можно воспользоваться формулой /I/. Для этого подбирают к рассеивающей линзе такую собирающую линзу, чтобы оптическая сила системы линз была положительной /рис.5/.

Такая система будет давать действительное изображение на экране, поэтому можно определить фокусное расстояние системы вышеописанным методом.

Определив фокусное расстояние собирающей линзы  $f_1$ , и системы линз  $F$ , можно из соотношения /I/ вычислить фокусное расстояние рассеивающей линзы  $f_2$ .

§ 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

I. В настоящей работе нужно найти фокусное расстояние собирающей и рассеивающей линз. Для чего в первую очередь определяют главное фокусное расстояние собирающей линзы.

Установив экран на определенном произвольно выбранном расстоянии от лампочки, перемещают находящуюся между ними исследуемую линзу вдоль оптической скамьи.

При этом перемещении необходимо найти два положения линзы, при которых будет наблюдаться четкое изображение нити: одно увеличенное, другое уменьшенное. Расстояния между лампочкой и экраном и результаты измерений заносятся в таблицу.

Опыт повторяют не менее трех раз.

Вид линзы	№ измерения	Положение изображ. предмета на оптическ. скамье	Полож. экрана на оптической скамье	Расстояние от предмета до экрана	$z$	$\Delta z$	Положение линзы на оптической скамье		Величина перемещен. линзы на оптической скамье	$\Delta z$
							при увеличен. изображении	при уменьш. изображении		
собирающая	1									
	2									
	3									
сред.										
система линз	1									
	2									
	3									
сред.										

2. Затем приставляют рассеивающую линзу к собирающей и продолжают все операции, указанные раньше. Это дает возможность определить фокусное расстояние системы линз  $F$ .

Точность измерения  $F$  будет мала, если величина  $z$  будет близка  $z$ . Поэтому прежде чем приступить к записям, следует подобрать такое расстояние между лампой и экраном, чтобы перемещение линзы было не особенно большим (порядка  $z/10$ ).

Для получения более четких изображений применяют диафрагму с небольшим отверстием, чтобы оставить открытой только центральную часть линзы, ибо формулы /2/ и /3/ справедливы только для центральных лучей.

3. Фокусное расстояние собирающей линзы  $F_1$  и системы линз  $F$  находят по формуле /8/, а фокусное расстояние рассеивающей линзы из соотношения /1/:

$$\frac{1}{F_2} = \frac{1}{F} - \frac{1}{F_1} . \quad /9/$$

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ОКОНЧАТЕЛЬНОГО РЕЗУЛЬТАТА.

Рассчитать относительную и абсолютную погрешности для собирающей линзы и системы линз аналитическим способом по формуле:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta Z + \Delta Z'}{Z - Z'} + \frac{\Delta Z + \Delta Z'}{Z + Z'} + \frac{\Delta Z}{Z} .$$

Ответ представить в виде:

$$\frac{\Delta F_1}{F} = \pm \dots \%$$

$$\Delta F = \pm \dots \%$$

$$F_1 = (\dots \pm \dots)$$

$$F = (\dots \pm \dots)$$

$$F = \dots$$

§ 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое линза? Какие виды линз бывает?
2. Что называется главным фокусом, оптической силой линзы и от чего она зависит?
3. Как построить изображение в собирающей и рассеивающей линзах?
4. Вывести расчетную формулу.
5. Как определить погрешности и окончательный результат?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА

Приборы и принадлежности: рефрактометр ИРН-22, кюветы с дистиллированной водой и исследуемыми растворами, фильтровальный бумаж или чистая хорошо впитывающая влагу ткань.

§ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Луч света при переходе через границу раздела двух сред преломляется. Способность вещества преломлять падающие на него лучи характеризуется абсолютным показателем преломления.

Абсолютным показателем преломления вещества называется отношение синуса угла падения луча, идущего из пустоты, к синусу угла преломления луча в данном веществе.

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (1)$$

Физическим понятием - отношением скорости света в вакууме к скорости в данной среде

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Так как на границе раздела сред пустота - воздух, луч света преломляется очень незначительно, то абсолютный показатель преломления воздуха практически равен 1, и за абсолютный показатель преломления вещества принимается отношение синуса угла падения луча, идущего из воздуха, к синусу угла преломления луча в данном веществе. Для воздуха /при 20°C/

$$n = 0,0002, \text{ воды} - 1,33, \text{ стекла} - 1,52 - 1,90.$$

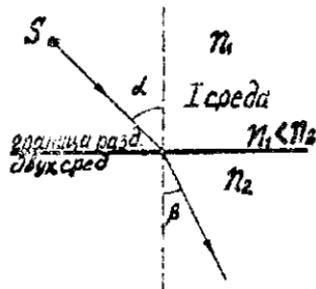


Рис. 1.

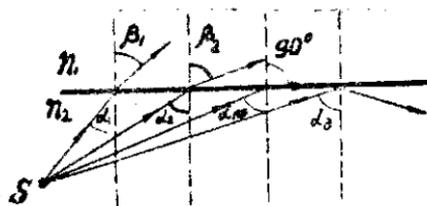


Рис. 2

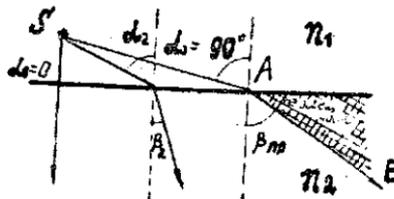


Рис. 3

В интервале значений  $1,3 - 1,7$  из двух сред оптически более плотной называется та среда, абсолютный показатель преломления которой больше и, наоборот, среда с меньшим показателем преломления называется оптически менее плотной.

При переходе света из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную /  $n_1 < n_2$  / угол преломления меньше угла падения. Преломленный луч приближается к перпендикуляру, восстановленному к поверхности раздела двух сред в точке его падения /рис.1/.

Наоборот, при переходе света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную угол преломления больше угла падения - преломленный луч удаляется от нормали, проведенной в точке его падения. Чем больше угол падения, тем больше угол преломления /рис.2/. При некотором угле падения  $\alpha_{кр}$  угол преломления  $\beta$  станет равным  $90^\circ$ , т.е. преломленный луч будет скользить по поверхности раздела двух сред.

Всякий луч, падающий из среды оптически более плотной под углом больше  $\alpha_{кр}$  не выйдет во вторую менее плотную среду, а полностью отразится от границ раздела сред. Это явление называется полным внутренним отражением.

Угол падения, которому соответствует угол преломления  $\beta_0 = 90^\circ$ , называется предельным углом падения. Рассчитать предельный угол падения можно, исходя из соотношений /рис.2/:

$$\frac{\sin \alpha_{кр}}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \beta_0 = 90^\circ, \quad \text{тогда}$$

$$\sin \alpha_{кр} = \frac{n_2}{n_1}. \quad 131$$

Рассмотрим теперь, что будет наблюдаться, если вблизи преломляющей поверхности со стороны оптически менее плотной среды будет находиться источник света. Углы падения лучей на поверхность будут иметь значения от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  /рис.3/.

Крайний луч, угол падения которого будет равен  $90^\circ$  /на рисунке - почти  $90^\circ$ / называется СКОЛЬЗЯЩИМ ЛУЧОМ. Скользящий луч преломится под углом  $\beta$ , который называют предельным углом преломления. Так как вторая среда оптически более плотная, то есть, что если бы луч шел из нее под углом  $\beta$ , то он не вышел бы в первую среду, а скользил бы по поверхности раздела. Поэтому предельный угол падения, если луч идет из среды оптически более плотной, равен предельному углу преломления, если свет идет из среды оптически менее плотной.

Во вторую среду не могут пройти лучи, угол преломления которых был бы больше  $\beta_{пр}$ .

Поэтому луч АВ окажется границей распространения света во второй среде. Правее луча АВ свет во вторую среду не проникает, поэтому эта часть среды будет темной, левее АВ - свет в среду проникает - она будет освещенной.

Таким образом, наблюдая границу распространения света во второй среде можно найти коэффициент преломления первой

среды:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta_{пр}} = \frac{n_2}{n_1}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ , откуда

$$n_1 = n_2 \sin \beta_{пр}. \quad /4/$$

Работа с рефрактометром как раз и основана на наблюдении границы распространения света в среде призмы, оптически более плотной, чем исследуемая среда.

## §2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Рефрактометрами называются приборы, служащие для определения показателя преломления твердых и жидких тел в интервале значений  $1,3 - 1,7$ . Название рефрактометра происходит от латинского слова рефлектирумус - переломить. В основе устройства рефрактометра лежит явление полного внутреннего отражения.

Впервые рефрактометрия для исследования жидкостей была применена в середине XVII века великим русским ученым Ломоносовым.

Так как показатель преломления растворов зависит от концентрации растворенного вещества, то определяют с помощью рефрактометра показатели преломления и по графикам находят процентное содержание растворенного вещества. Главными деталями рефрактометра являются две прямоугольные призмы /рассеивающая  $ABC$  и анализаторная  $A'B'C'$ /, между гипотенузными гранями которых помещается слой исследуемой жидкости  $AA'C'C$  /рис. 4/. Здесь поверхность  $AC$  - матовая,  $A'C'$  - прозрачная. Из призмы  $ABC$  в жидкость входят лучи различных направлений. Оптическая схема прибора состоит из визирной и отсчетной систем /рис.5/.

В визирной системе лучи света от зеркала 1 направляются в осветительную призму 2, проходят тонкий слой исследуемой жидкости, измерительную призму 3, защитное стекло 4, компенсатор 5 и попадают в объектив 6; далее, переломляясь призмой 7, проходят пластинку 8 с перекрестием и через окуляр 9 попадают в глаз наблюдателя.

В отсчетной системе с помощью осветительного зеркала 10 подсвечивается шкала II, которая призмой 12 и микрообъективом 13 через призмы 14 и 15 проектируется в фокальную плоскость окуляра 9 — общего для обеих систем. Таким образом, в поле зрения окуляра можно одновременно наблюдать границу раздела, проектируемую визирной системой, перекрестие пластинки 8 и штрихи шкалы II, проектируемые отсчетной системой.

Внешний вид рефрактометра показан на рис. 6. Здесь измерительная головка 6 представляет собой 2 литых полушария, которые служат оправами измерительной и осветительной призм /рис.4/.

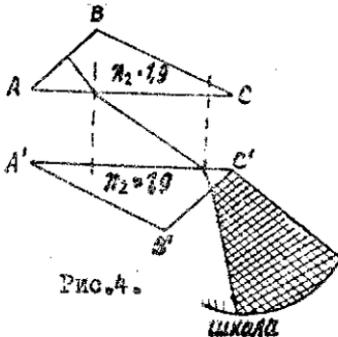


Рис.4.

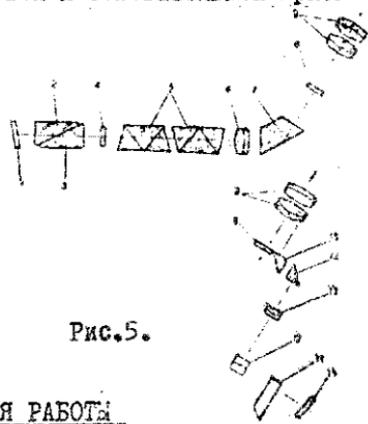


Рис.5.

### § 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проверить нулевую точку прибора. Для этого откинуть верхнюю призму в головке 2 /рис.6/ и чистой тряпочкой, смоченной дистиллированной водой протереть поверхности призмы.

На нижнюю призму нанести пинеткой каплю дистиллированной воды и закрыть ее верхней призмой. С помощью окуляра добиться, чтобы шкала и поле были резко видны. Для освещения исследуемого вещества пользоваться осветительным зеркалом 13 через окно 15 закрепляя его винтом 16.

Для подсветки шкалы показателей преломления пользоваться зеркалом.

14. Вращая маховичок 10 /он поворачивает измерительную головку/ и наблюдая в окуляр зрительной трубы, находят границу раздела света и тени, которую совмещают с визирной линией шкалы. Маховичком 11 устраняют окрашенность поля зрения /при этом поворачивается компенсатор 5 /рис.5/.

При правильной установке прибора граница раздела должна проходить через показатель преломления 1.333 на шкале /дистиллированной воды при 20°C/.

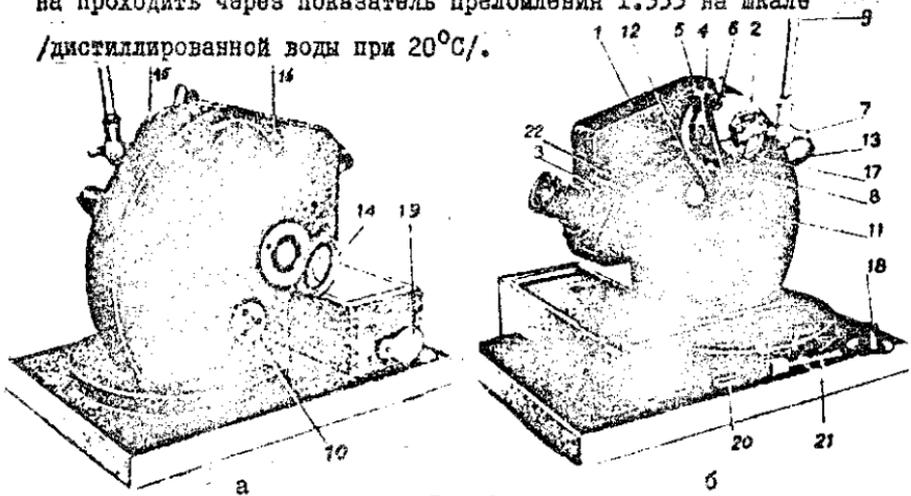


Рис.6

Если температура отличается от 20°C, то линия раздела пройдет где-то вблизи 1.333.

2. Получить градуировочные данные.

Для этого, откинуть верхнюю призму, протереть сухой тряпочкой поверхности призмы и нанести каплю раствора с известной концентрацией. Добиться совпадения визирной линии шкалы и границы раздела темного и светлого полей.

Повторить то же самое для других растворов с известной концентрацией, каждый раз тщательно удаляя каплю предыдущего

раствора. Показатели преломления записать в таблицу.

№ пп	Раствор	Концентрация в %	Коэффициент преломления
1.	Дистил. вода	-	1,333
2.	NaCl	5	
3.	NaCl	10	
4.	NaCl	15	
5.	NaCl	x	

3. Определить показатель преломления раствора с неизвестной концентрацией.

4. По данным таблицы построить график зависимости коэффициента преломления раствора соли от его концентрации, откладывая на оси  $X$  - концентрацию, а по оси  $Y$  - показатель преломления.

5. По графику найти неизвестную концентрацию.

6. Тщательно протереть сам прибор, не оставляя следов раствора.

#### § 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется абсолютным и относительным показателем преломления?

2. Какие среды называются оптически более плотными и менее плотными?

3. В чем заключается явление полного внутреннего отражения? Какой угол является предельным?

4. Для чего предназначен рефрактометр и на каких физических явлениях основано определение концентрации раствора?

5. Как устроен рефрактометр ИРФ-22?

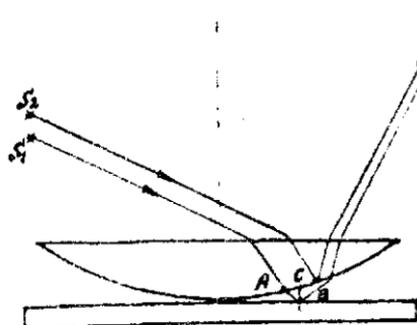


Рис. I

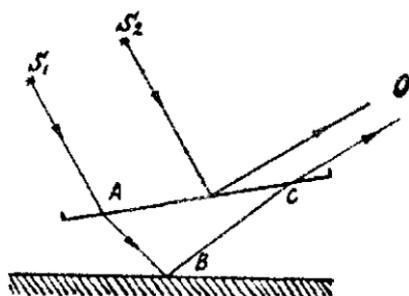


Рис. 2

Начиная от точки С, оба луча, отраженные от поверхности пластины и от поверхности воздушной прослойки, идут вместе и, сведенные в одну точку, интерферируют. Для расчета результата интерференции нужно знать разность хода, образовавшуюся до точки С. Если толщина воздушной прослойки в этом месте равна  $d$ , а  $AB = BC$ , то геометрическая разность хода  $AB + BC = 2d$ . При отражении 1-го луча от поверхности пластинки произошла перемена фазы на обратную, что равносильно потере полуволны; отражение же 2-го луча произошло от менее плотной среды - воздуха, без изменения фазы. В силу этого оптическая разность хода

$$\delta = 2d + \frac{\lambda}{2}. \quad (I)$$

В тех местах, где это выражение будет равно нечетному числу полуволн

$$2d + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

При рассматривании линзы в проходящем свете наблюдается обратная картина: в центре — светлое круглое пятно, вокруг ряд чередующихся светлых и темных колец. При этом все светлые кольца наблюдаются в проходящем свете на тех местах, где в отраженном наблюдались темные и наоборот.

При пользовании белым светом в центре наблюдается темное пятно в отраженном свете, белое — в проходящем, окруженное рядом цветных колец, чередующихся оттенков.

Явление это было впервые описано современником Ньютона — Р. Гуком. Ньютон же подробно исследовал его и установил связь между радиусом колец и радиусом линзы, почему это явление и получило название "колец Ньютона".

Возникновение колец Ньютона объясняется интерференцией световых волн, отраженных от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки между линзой и плоской пластинкой.

Если на линзу направить поток плоских монохроматических световых волн ( $\lambda$ ), то часть волн пройдет по пути  $S_1AB$  (рис. 1, 2), пройдет в воздушную прослойку, отразится от плоской стеклянной пластинки и пойдет по пути  $BCO$ . Другая часть пройдет по пути  $S_2CO$  — отразится от поверхности воздушной прослойки в стекло. Направления лучей, начиная от точки  $C$ , будут приблизительно одинаковы. Они тем больше будут совпадать друг с другом, чем ближе направления падающих на пластинку лучей к нормальным и чем больше радиус кривизны линзы. В этом случае можно считать  $AB = BC$ .

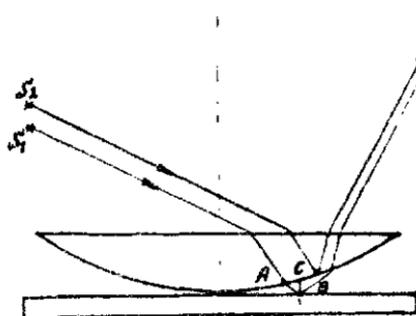


Рис. 1

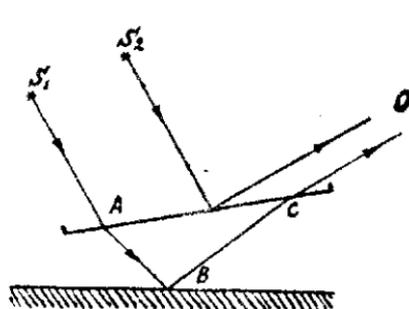


Рис. 2

Начиная от точки С, оба луча, отраженные от поверхности пластины и от поверхности воздушной прослойки, идут вместе и, сведенные в одну точку, интерферируют. Для расчета результата интерференции нужно знать разность хода, образовавшуюся до точки С. Если толщина воздушной прослойки в этом месте равна  $d$ , а  $AB = BC$ , то геометрическая разность хода  $AB + BC = 2d$ . При отражении 1-го луча от поверхности пластины произошла перемена фазы на обратную, что равносильно потере полуволны; отражение же 2-го луча произошло от менее плотной среды - воздуха, без изменения фазы. В силу этого оптическая разность хода

$$\delta = 2d + \frac{\lambda}{2}. \quad (1)$$

В тех местах, где это выражение будет равно нечетному числу полуволн

$$2d + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$2d = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

В результате интерференции будет наблюдаться отсутствие света.

Места с одинаковой толщиной  $d$  воздушной прослойки образуют concentрические окружности с центром в точке соприкосновения линзы и пластинки, поэтому в результате интерференции наблюдаются черные кольца.

В тех же местах, для которых

$$\delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2}.$$

или  $2d = (2m - 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (3)$

где  $m = 1, 2, 3, \dots$ , наблюдаются светлые кольца.

Толщина воздушной прослойки в том месте, где наблюдается черное кольцо, легко может быть связана с радиусом этого кольца. Дополним мысленно поверхность линзы до сферы радиуса  $R$ , часть которой представляет поверхность линзы. Если  $AB$  - есть радиус  $m$ -го кольца -  $r_m$  (рис.3),

$CD = AB = r_m, CB = AD = d, a CD^2 = ED \cdot DA = (2R - d)d,$   
тогда  $r_m^2 = 2dR - d^2.$  Так как  $d$  очень мало по сравнению с  $R$ , то  $d^2$  будет мало по сравнению с  $2dR$  и

$$r_{m\text{чр.}}^2 = 2dR. \quad (4)$$

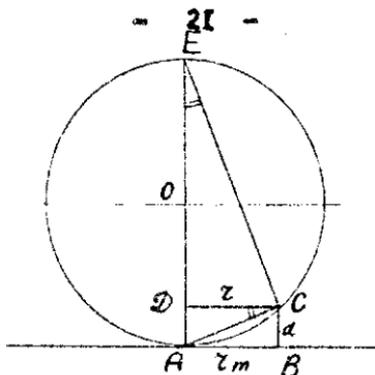


Рис. 3

Подставляя (2) в (4) имеем

$$r_m^2 = 2m \frac{R\lambda}{2}$$

и, наконец, радиус темного кольца

$$r_{m\text{тем}} = \sqrt{2m \frac{R\lambda}{2}}. \quad (5)$$

Радиусы черных колец пропорциональны корням квадратным из ряда последовательных четных чисел (так как "0" есть четное число, то эта теорема учитывает и центральное черное пятно).

Для радиусов светлых колец из (4) и (3) получим

$$r_m^2 = (2m-1) \frac{R\lambda}{2}$$

откуда

$$r_{m\text{сл}} = \sqrt{(2m-1) \frac{R\lambda}{2}}. \quad (6)$$

Радиусы светлых колец Ньютона пропорциональны корням квадратным из ряда последовательных нечетных чисел.

Формула (5) дает возможность, если известна длина световой волны, которой освещается пластинка с линзой, определить радиус кривизны поверхности линзы. Однако, если между линзой и пластинкой попадает пылинка, чего почти невозможно избежать, то в результате применения формулы (5)

нельзя получить верного результата.

Если некоторое, например,  $m$ -ое кольцо наблюдается там, где толщина воздушной прослойки равна  $dm$ , то следующее  $(m+1)$  кольцо будет наблюдаться там, где разность АВ+ВС (рис.2) возрастает на  $\frac{\lambda}{2}$ . Коротче говоря, при переходе от какого-нибудь черного кольца к следующему, считая от центра, толщина воздушной прослойки возрастает на  $\frac{\lambda}{2}$ , а при переходе от  $m$ -ого к  $n$ -ому кольцу толщина воздушной прослойки возрастает на  $n-m$  полуволин, т.е.

$$dn - dm = (n-m) \frac{\lambda}{2}. \quad (7)$$

Из формулы (4) следует, что

$$dn = \frac{zn^2}{2R} \quad \text{и} \quad dm = \frac{zm^2}{2R}. \quad (8)$$

Подставляя эти выражения в (7) получим:

$$\frac{zn^2}{2R} - \frac{zm^2}{2R} = (n-m) \frac{\lambda}{2}$$

откуда

$$R = \frac{(zn - zm)(zn + zm)}{(n-m)\lambda}, \quad (9)$$

если определяем радиус кривизны линзы или

$$\lambda = \frac{(zn - zm)(zn + zm)}{(n-m)R}, \quad (10)$$

если измеряем длину волны света.

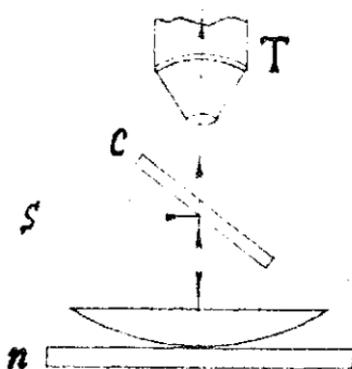


рис. 4

§ 2. Описание прибора.

На столике микроскопа (рис. 4) лежит полированная стеклянная пластинка **н**, на которую положена линза выпуклой стороной вниз.

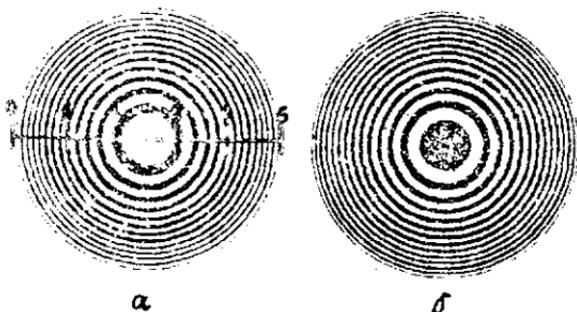


Рис. 5

Микроскоп снабжен осветителем, представляющим собой небольшую трубку, конец которой закрыт стеклом, пропускающим свет (  $\mathcal{S}$  ) очень узкой полосы спектра—практически монохроматический. Свет из осветителя падает на тонкую плоскопараллельную стеклянную пластинку "С", наклоненную под углом  $45^\circ$  к оси микроскопа. Пластинка эта отражает часть падающих на нее лучей вниз на линзу, лежащую на пластинке. Лучи проходят сквозь линзу, падают на пластинку "П" перпендикулярно к ней, отражаются ею по прямо-противоположному направлению и проходят через пластинку С в микроскоп.

В окуляре микроскопа в том месте, где образуется действительное изображение картины колец Ньютона, расположена прозрачная окулярная шкала ( или окуляр-микрометр ) дающая возможность измерить видимые радиусы колец.

### § 3. Порядок выполнения работы.

1. Зажигают осветитель и небольшими поворотами стеклянной пластинки С добиваются наиболее яркого освещения поля зрения.

Если в поле зрения колец не видно, осторожно перемещают пластинку с линзой по столику микроскопа до тех пор, пока в поле зрения не появятся кольца.

2. Фокусируя микроскоп на наибольшую резкость, добиваются такого положения колец, чтобы шкала расположилась вдоль диаметра колец, а центр колец пришелся вблизи середины шкалы ( рис.5).

После этого можно приступить к определению диаметра колец в единицах шкалы, занося результаты в таблицу.

Ввиду того, что кольца имеют заметную ширину, следует находить отметку, отвечающую концу среднего диаметра. Отсчеты делать с максимальной точностью, которую позволяет глаз и навык наблюдателя - 0,2 деления или, во всяком случае, не менее чем 0,5 деления.

3. Так как диаметры колец окажутся измеренными в делениях шкалы, то их придется умножить на коэффициент  $K$ -цену деления шкалы. Тогда расчетная формула приобретает следующий вид:

$$R = \frac{(d_n - d_m)(d_n + d_m)}{4(n - m)\lambda} K^2 \quad (II)$$

или

$$\lambda = \frac{(d_n - d_m)(d_n + d_m)}{4(n - m)R} K^2. \quad (I2)$$

( Эти формулы получены из (9) и (10) с учетом , что

$$r = \frac{d}{2} ).$$

4. При вычислении по формулам ( II) и (I2) для уменьшения погрешности результата следует  $n - m$  брать не очень малым, равным 1 или 2, а достаточно большим. Для этого нужно измерить диаметры возможно большего числа колец.

№ п/п	$\lambda$	$K$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_{cp}$	$\Delta R$
I.	7000Å или $7 \cdot 10^{-7}$	0,05мм или $5 \cdot 10^{-5}$											
Среднее													

Каждый диаметр измерить не менее 3-х раз, а из различных диаметров найти 5 раз радиус линзы и ответ представить в виде  $R = (R_{cp} \pm \Delta R)_{м}$ .

#### § 4. Контрольные вопросы.

1. В чём заключается явление интерференции и каковы условия его наблюдения?
2. Чем объясняется появление колец Ньютона?
3. Вывести формулы для нахождения радиусов светлых и темных колец Ньютона.
4. Дать вывод рабочей формулы.
5. Порядок выполнения работы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ  
ПРИ ПОМОЩИ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Приборы и принадлежности: Дифракционная решетка на подставке, гониометр, источник сплошного спектра.

§ I. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Явление отклонения света в область геометрической тени называется дифракцией света. Она хорошо наблюдается при прохождении световых волн через узкие отверстия или около малых преград, соизмеренных с длиной волны. При пользовании монохроматическим светом при дифракции будет наблюдаться система чередующихся светлых и темных полос /максимумов и минимумов/.

Если плоская монохроматическая волна падает нормально на ряд параллельных щелей, то каждая из щелей будет давать дифракционные максимумы и минимумы, но при этом явление не сводится только к действию отдельных щелей. Наиболее существенной стороной явления будет в этом случае интерференция волн, исходящих из различных щелей, которая приведет к перераспределению в пространстве световой энергии.

Система, состоящая из чередующихся прозрачных и непрозрачных промежутков называется дифракционной решеткой.

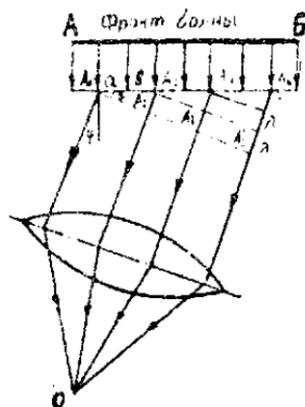
Простейшая форма дифракционной решетки представляет собой стеклянную пластинку, на которой с помощью делительной машины нанесен ряд параллельных штрихов, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Места, прочерченные делительной машиной рассеивают свет во все стороны. Они являются практически непрозрачными промежутками между неповрежденными частями пластинки, которые пропускают свет.

В случае многих щелей к минимумам света, создаваемым каждой щелью порознь, добавляются минимумы, возникающие в результате интерференции света, прошедшего через различные щели. Это сказывается в том, что широкие светлые полосы, даваемые одной узкой щелью, покрываются рядом более тонких полос, вызванных интерференцией лучей, исходящих от разных щелей: первой и второй, первой и третьей и т.д. Чем больше щелей, тем больше возникает добавочных максимумов - минимумов.

Если для произвольно выбранного направления наблюдения разность хода лучей  $R$  двух соседних щелей равна целому числу длин волн, то и разность хода лучей всех остальных щелей в данном направлении будет также равна целому числу длин волн.

В этом случае вся световая энергия, проходящая через решетку, сосредотачивается в этих избранных направлениях, во всех же остальных направлениях, благодаря появлению новых минимумов, свет не проходит вовсе.

На рис. I. изображена дифракционная решетка, где  $a$  - ширина щели,  $b$  - ширина промежутка между щелями,  $a+b$  - постоянная или интервал решетки, на которую падает нормально к ее плоскости пучок параллельных монохроматических лучей. Угол  $\varphi$  определяет избранное направление наблюдения и называется углом дифракции. Точки двух соседних щелей, отстоящие друг от друга на расстоянии  $a+b$ , называются "соответственными". Лучи, идущие в избранном направлении от соответственных точек, будут интерферировать  $AC, A'C'$  и т.д., так как в избранном направлении разность хода лучей для всех пар соответственных точек одинакова.



Усиление света между первым и вторым лучами будет происходить для тех направлений, для которых разность хода

рис. I

$$R = A_1 A_2 = (a+b) \sin \psi = m\lambda. \quad (1)$$

где  $m$  - целое число.

Аналогичное явление будет иметь место для  $m=3, 4, 5$  и т.д. лучей:

$$\begin{aligned} R = A_3 A_3 &= 2(a+b) \sin \psi = 2m\lambda, \\ R = A_4 A_4 &= 3(a+b) \sin \psi = 3m\lambda. \end{aligned} \quad (2)$$

Все разности хода параллельных лучей, идущих в направлении  $\psi$  для различных щелей, равны целому числу волн, вследствие чего при наложении лучей друг на друга в этом направлении волны имеют одинаковые фазы, что приведет к усилению света. Из формул /1/ или /2/ можно определить направление, в котором будет наблюдаться максимум света

$$\sin \psi = \frac{m\lambda}{a+b}. \quad /3/$$

При  $m=0$  возникает центральная полоса; при  $m=1$  - две первые полосы справа и слева от нулевой полосы и т.д.

Из рассмотрения формулы /3/ можно сделать следующие заключения:

1. Каждому целому значению  $m$  соответствует два максимума дифракционной картины первого, второго и т.д. порядков, лежащих симметрично относительно направления  $\varphi = 0$ .

2. При освещении решетки белым светом, каждому значению  $m$  будет соответствовать целый ряд пространственно несопадающих максимумов, образованных лучами различных длин волн.

Эти светлые дифракционные полосы разных цветов, переходя друг в друга, образуют дифракционные спектры 1, 2-го и т.д. порядков /рис.2/.

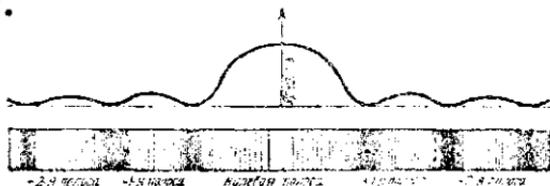


Рис. 2.

В направлении  $\varphi = 0$  возникает белая полоса, так как в этом направлении все волны, падающие на экран имеют одинаковые фазы. Спектры высоких порядков /начиная с 3-го/ накладываются друг на друга, что приводит к уменьшению яркости спектров. Например, если взять оранжевые лучи в спектре 2-го порядка /  $\lambda = 600 \text{ мкм}$  /, фиолетовые лучи /  $\lambda = 400 \text{ мкм}$  / в спектре 3-го порядка, то для них углы дифракции будут одинаковы

$$\sin \varphi_{ор} = \frac{2 \cdot 600}{a+b}, \quad \sin \varphi_{ф} = \frac{3 \cdot 400}{a+b} \quad \text{т.е. } \varphi_{ор} = \varphi_{ф} \text{ и}$$

оранжевая часть спектра 2-го порядка будет совпадать с фиолетовой частью спектра 3-го порядка.

На рис.3 изображено расположение фиолетовой и красной линий в дифракционных спектрах 1, 2 и 3-го порядков. Из рисунка видно, что начало спектра 3-го порядка накладывается на ко-

нец спектра 2-го порядка. Чем выше порядки, тем больше перекрываются спектры.

При освещении дифракционной решетки светом, испускаемым разреженными газами или парами, дифракционные спектры получаются в виде цветных линий; причем в спектрах всех порядков меньше всего будут отклонены от первоначального направления лучи с самой малой длиной волны, т.е. фиолетовые и синие; больше всего отклоняются лучи с наибольшей длиной волны, т.е. красные лучи.

Формула /3/ дает возможность опытным путем определить длину световой волны. Если выразить из формулы /3/, то в правой части равенства окажутся величины, доступные непосредственному измерению.

$$\lambda = \frac{(a+b) \sin \varphi}{m} \quad /4/.$$

Если  $(a+b)$  известно из паспорта выбранной для работы решетки, то задача определения длины световой волны сводится к определению угла дифракции  $\varphi$  в спектре выбранного порядка.

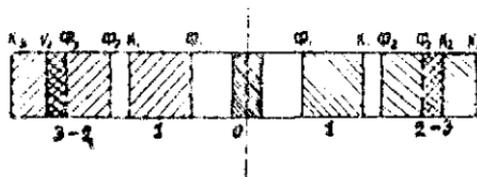


Рис.3

## § 2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Упрощенный гониометр состоит из горизонтального круга, разделенного на градусы. Круг этот носит название лимба.

К лимбу крепится неподвижно коллиматорная труба  $A$  с целью и зрительная труба  $B$  с окуляром, которая может вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через центр лимба. Указатель положения трубы с конусом при этом перемещается над градусной шкалой лимба. Цена деления конуса равна  $1'$ . В центре лимба имеется столик для помещения дифракционной решетки.

### § 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Устанавливают дифракционную решетку на столик гониометра так, чтобы ее штрихи были параллельны цели коллиматора  $A$  /рис. 4/, а плоскость ее была перпендикулярна направлению падающих на нее лучей, т.е. с оси коллиматора.

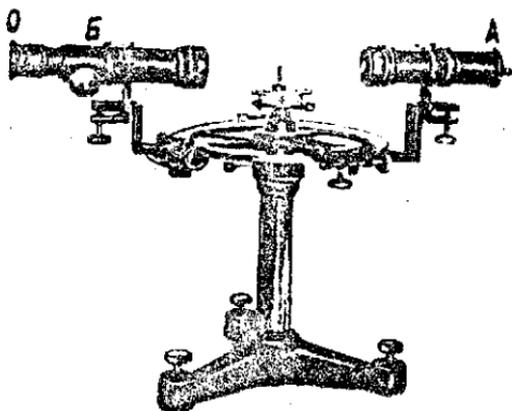


Рис. 4.

2. Перед щелью коллиматора помещается источник света

Щель коллиматора находится в главном фокусе линзы, поэтому выходящие из коллиматора лучи идут параллельным пучком и падают на дифракционную решетку нормально.

3. Устанавливают зрительную трубу сначала по направлению оси коллиматора и наводят ее указатель - нить на середину центрального белого максимума. При этом следует сфокусировать окуляр зрительной трубы  $O$  по своему глазу так, чтобы одновременно были четко видны нить трубы и центральный дифракционный максимум /центральное изображение щели коллиматора - белая полоса/.

4. Вращая трубу по часовой стрелке, наводят ее нить, например, на середину зеленой линии дифракционного спектра I-го порядка, расположенную слева от центрального дифракционного максимума. Производят отсчет  $\alpha_2$  по лимбу и нониусу с точностью до  $1'$ . Далее, поворачивая трубу против часовой стрелки, наводят ее нить на середину зеленой линии спектра I-го порядка, расположенную вправо от центрального максимума и получают  $\alpha_1$ . Заносят полученные результаты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в таблицу и подсчитывают угол дифракции  $\varphi_1$  по формуле

$$\varphi_1 = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}. \quad (5)$$

Повторяют указанные измерения не менее 5 раз и находят среднее значение угла дифракции  $\varphi_{cp}$ . Если при вращении трубы против часовой стрелки совершится переход через  $0^\circ$ , то необходимо пользоваться формулой:

$$\varphi_2 = \frac{(\alpha_1 + 360^\circ) - \alpha_2}{2}. \quad /6/$$

Подставив среднее значение угла дифракции  $\psi_{ср}$  в формулу /4/, находят искомую длину волны.

Аналогично находят длину волны в спектре 2-го, 3-го и т.д. порядков.

Таблица записей результатов наблюдений.

№	Постоянная решетки ( $a+b$ )	Линия спектра, для которой опр. $\lambda$	Отсчеты положений зрительной трубы		Угол дифракц. в град. $\psi_i$	В радианах $\Delta\psi_i$
			левое	правое		
			$d_i$ в градусах	$d'_i$ в градусах		
1.	0,01мм					
2.						

Примечание: Каждый из выполняющих работу определяет длину волны какой-нибудь одной линии спектра.

#### § 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ОКОНЧАТЕЛЬНОГО РЕЗУЛЬТАТА

Для получения формулы абсолютной ошибки пользуются обычным методом: логарифмируем, а затем дифференцируем формулу /4/. В итоге получим /считая  $m$  и  $(a+b)$  постоянными/

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \operatorname{ctg} \psi_{ср} \cdot \Delta\psi$$

откуда

$$\Delta\lambda = \lambda \operatorname{ctg} \psi_{ср} \cdot \Delta\psi, \quad /7/$$

где  $\Delta\psi$  - средняя арифметическая ошибка из абсолютных ошибок отдельных измерений, выраженных в радианах:

$$\Delta\psi = \frac{|\Delta\psi_1| + |\Delta\psi_2| + \dots + |\Delta\psi_l|}{l} \cdot /8/$$

§ 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется дифракцией света и каковы условия ее наблюдения?
2. В чем отличие дифракционной картины на одной щели от дифракционной картины на многих щелях?
3. Дать вывод условия главных максимумов и расчетной формулы.
4. Что называется дифракционной решеткой?
5. Дать схему дифракционного спектра.
6. В чем отличие дифракционного спектра от призматического?

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ  
ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Приборы и принадлежности: Фотометрическая скамья, селеновый фотоэлемент, анализатор, поляризатор, источник света и гальванометр.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Световая волна /как и любая электромагнитная волна/ характеризуется колебанием двух векторов: вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ .

Вектор  $\vec{E}$  всегда колеблется перпендикулярно  $\vec{H}$ , причем, каждый из этих векторов перпендикулярен направлению луча света.

Свет, в котором в одинаковой мере присутствуют поперечные колебания всех направлений, называется естественным светом /рис. 1а/.

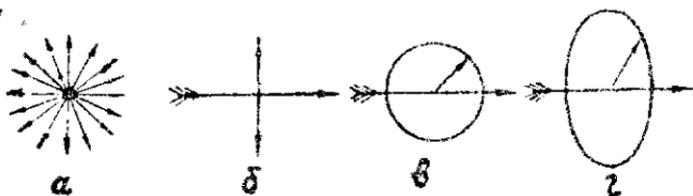


Рис. I

Существуют тела /поляризаторы/, при прохождении которых естественный луч света становится поляризованным /упорядоченным/.

Различают три вида поляризованного света: плоско /или линейно/ поляризованный свет, у которого колебания электрического вектора происходят в одной плоскости, циркулярно /по кругу/ и эллиптически поляризованный свет — когда конец элект-

рического вектора описывает круг или эллипс / рис. 1 (б, в, г) /  
В данной работе мы будем рассматривать только плоско-поляри-  
зованный свет.

Механизм поляризации естественного луча поляризатором  
можно представить следующим образом.

Каждый электрический вектор естественного луча при  
прохождении через поляризатор разлагается по правилу параллело-  
грамма на 2 взаимно перпендикулярных составляющих,  
та составляющая, которая совпадает с главным сечением поляри-  
затора /плоскость, проходящая через преломленный луч в крис-  
талле и оптическую ось/ пропускается.

Если свет проходит через поляризатор и попадает на эк-  
ран, то, вращая поляризатор, мы не заметим никакого изменения  
интенсивности света на экране.

Глаз не воспринимает изменения плоскости колебаний  
электрического вектора и не может быть анализатором поляризо-  
ванного света. Наблюдаемая картина изменится, если между по-  
ляризатором и экраном поместить еще один поляризатор. При  
вращении второго поляризатора интенсивность светового пятна  
на экране изменяется от нуля до определенного максимума.  
Второй поляризатор позволяет обнаружить, поляризован ли луч  
света, и поэтому называется анализатором.

На рис. 2 представлена механическая аналогия анализато-  
ра. Рука создает поперечные поляризованные волны на длинной  
веревке. Щель является анализатором. Если плоскость колебаний  
волны параллельна щели, то колебания щелью пропускаются.  
Если плоскость колебаний пересекает анализатор перпендикуляр-  
но щели, то колебания щелью задерживаются.



Рис. 2

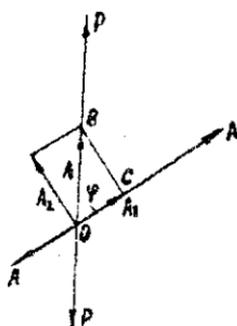


Рис. 3

За щель колебания отсутствуют.

Определим закон изменения интенсивности поляризованного света, прошедшего анализатор, в зависимости от взаимной ориентации главных сечений поляризатора и анализатора. Эта ориентация оценивается углом между главными сечениями поляризатора и анализатора.

Допустим, что анализатор пропускает колебания в плоскости  $AA$ , а через поляризатор прошли колебания электрического вектора, совершаемые в плоскости  $PP$  рис.3. Результирующую амплитуду электрического вектора поляризованного света обозначим  $A$ . Анализатором пропустится лишь компонент  $A_1$

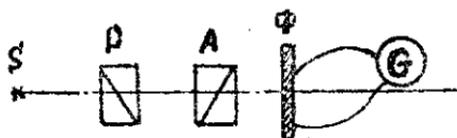


Рис.4

Интенсивность поляризованного света  $\mathcal{J}$ , прошедшего через анализатор, пропорциональна квадрату амплитуды  $A_1$  колебания, пропущенного анализатором т.е.  $\mathcal{J} = kA_1^2$ . /1/ Из треугольника ОСВ /рис.3/ видно, что амплитуда  $A_1$  связана с амплитудой поляризованного света  $A$  соотношением:

$$A_1 = A \cos \varphi, \quad /2/$$

где  $\varphi$  - угол между главными сечениями поляризатора и анализатора.

Выражение /1/ с учетом /2/ принимает вид:

обозначим 
$$\mathcal{J} = kA^2 \cos^2 \varphi. \quad /4/$$

через  $\mathcal{J}_0 = kA^2$  интенсивность поляризованного света, падающего на анализатор. Тогда

$$\mathcal{J} = \mathcal{J}_0 \cos^2 \varphi. \quad /5/$$

Формула /5/ устанавливает закон изменения интенсивности поляризованного света, прошедшего через анализатор /закон Малюса/. Этот закон справедлив для любых поляризаторов и анализаторов.

Целью данной работы является проверка справедливости закона изменения интенсивности /5/.

## § 2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

На фотометрической скамье /рис.4/ смонтированы источник света  $S$ , поляризатор  $P$  и анализатор  $A$  /поляроиды в металлической оправе/, фотоэлемент  $\Phi$ . Фотоэлемент соединен с гальванометром  $G$ . Источник света, поляризатор, анализатор и фотоэлемент расположены на одном уровне с тем рас-

четом, чтобы световой луч падал перпендикулярно на фотозоэлемент. Угол  $\varphi$  между главными сечениями поляризатора и анализатора может изменяться вращением оправы анализатора. Для отсчета величины угла  $\varphi$  анализатор снабжен указателем, а его справа лимбом, на котором нанесены градусные деления.

Измерение интенсивности поляризованного света производится при помощи сравнения ее с освещенностью фотозоэлемента. Освещенность фотозоэлемента определяется показаниями гальванометра.

Из фотометрии известно, что

$$E = \frac{J}{r^2}, \quad /1/$$

где:  $E$  - освещенность,  $J$  - сила света, прошедшего анализатор,  $r$  - расстояние до источника света. Здесь  $r$  - величина постоянная.

При перпендикулярном падении света интенсивность прямо пропорциональна силе света.

Следовательно:

$$\frac{J}{J_0} = \frac{E}{E_0} \quad /2/$$

но  $\frac{E}{E_0} = \frac{n}{n_0}$ , /3/

где  $n$  - число делений гальванометра,

$n_0$  - число делений при  $\varphi = 0$

Из рассмотрения /2/ и /3/ видим, что

$$\frac{J}{J_0} = \frac{n}{n_0} \quad /4/$$

Практическая проверка закона изменения интенсивности поляризованного света, прошедшего анализатор, состоит в сравнении  $\cos^2 \varphi$  с величиной  $\frac{n}{n_0}$ .

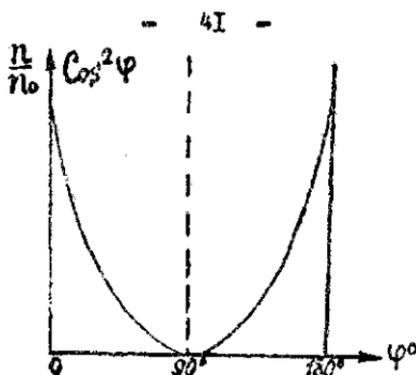


Рис. 5.

### § 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включают источник света, выключив общий свет в комнате.
  2. Ставят анализатор в положение, для которого  $\varphi = 0$ ; Записывают в таблицу № I показания гальванометра  $I_0$  соответствует интенсивности поляризованного света подающего на анализатор/.
  3. Затем повторяют опыт для  $\varphi = 10^\circ, 20^\circ, \dots, 180^\circ$  и заносят результат в таблицу.
- Каждое определение произвести не менее 3 раз.

4. На одном и том же графике в прямоугольной системе координат строится экспериментальная зависимость  $\frac{n}{n_0} = f(\varphi)$  из таблицы I и теоретическая зависимость /рис 5/

$$\cos^2 \varphi = f(\varphi) \quad / \text{из таблицы 2}/$$

Таблица I

$\varphi$	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_{\text{ср}}$
$0^\circ$					
$10^\circ$					
$\vdots$					
$170^\circ$					
$180^\circ$					

Таблица 2.

$\varphi$	$\cos^2 \varphi$	$\varphi$
$0^\circ$	1,00	$180^\circ$
$10^\circ$	0,970	$170^\circ$
$20^\circ$	0,884	$160^\circ$
$30^\circ$	0,752	$150^\circ$
$40^\circ$	0,588	$140^\circ$
$50^\circ$	0,414	$130^\circ$
$60^\circ$	0,250	$120^\circ$
$70^\circ$	0,117	$110^\circ$
$80^\circ$	0,030	$100^\circ$
$90^\circ$	0,000	

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется естественным светом?
2. Какой свет является поляризованным и чем он отличается от естественного?
3. Что называется поляризатором и анализатором и какова их роль?
4. Вывести закон Малюса.
5. В чем заключается цель данной работы и как она осуществляется?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА  
САХАРА ПОЛУТЕНЕВЫМ ПОЛЯРИМЕТРОМ

Приборы и принадлежности: Полутеневой поляриметр, натриевая лампа или другой источник света /со светофильтром/, кюветы для растворов, дистиллированная вода, растворы сахара с известной и неизвестной концентрациями.

§ I. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ.

Видимый свет представляет собой электромагнитные колебания, длина волны которых лежит в пределах 0,38 - 0,76 микрона. Электромагнитная волна характеризуется колебанием двух векторов: вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ .

Световые волны, как и всякие другие электромагнитные волны являются поперечными волнами. Вектор  $\vec{E}$  колеблется всегда в плоскости, перпендикулярной к плоскости колебаний вектора  $\vec{H}$ . Причем, каждый из этих векторов перпендикулярен направлению распространения света /рис.1/

Все источники света излучают световые волны, колебания которых не упорядочены, иными словами, векторы напряженности электрического и, соответственно, магнитного полей лежат во всевозможно ориентированных и беспрерывно меняющих свое направление плоскостях. Такой свет называют естественным.

Свет, в котором вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$  колеблется все время только в одной плоскости, называется поляризованным светом.

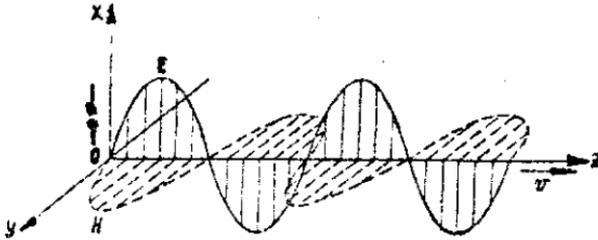


Рис. 1

Если, кроме одного преимущественного направления, плоскости колебания каждого из векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  есть в некоторые другие направления, то такой свет называют поляризованным. Явление поляризации света можно рассматривать как процесс выделения из всевозможных ориентировочных плоскостей колебаний вектора  $\vec{E}$  соответственно и  $\vec{H}$  одного преимущественного направления плоскости колебаний. На рис. 2 дается схематическое изображение поляризованного и естественного света.

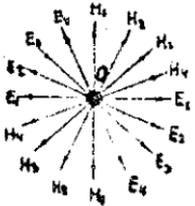


Рис. 2

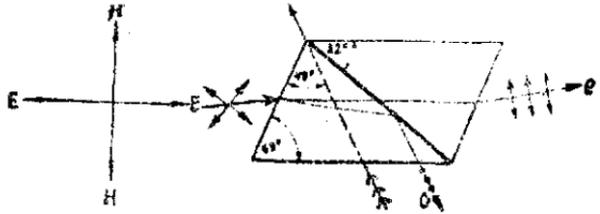


Рис. 3

Пусть через точку  $O$  перпендикулярно к плоскости рисунка проходит луч. Векторы  $\vec{EOE}$  изображают направление колебаний вектора напряженности электрического поля, векторы  $\vec{HON}$  - магнитного поля. Эти плоскости перпендикулярны плоскости рисунка и проходят через направление луча. Рис. 2а изображает естественный неполяризованный свет, рис. 2б - частично поляризованный, рис. 2в - полностью поляризованный свет.

Поляризация происходит при отражении света от поверхности диэлектриков, при преломлении в них, а также при прохождении света через анизотропные среды, например, кристаллы кварца, турмалина, исландского шпата и др.

В лаборатории поляризованный свет получают с помощью приборов, называемых поляризаторами. К ним относятся поляризационные приемы Николя, Волластона, дихроичные пластинки /пластинки турмалина, полярроиды/ и др.

В полутеневых поляриметрах для этой цели чаще всего используется призма Николя /николи/ ( рис. 3), а в некоторых случаях полярроиды.

Свойства поляризованного света во многом отличаются от свойств естественного света. Например, при прохождении поляризованного света через некоторые среды плоскость поляризации его поворачивается. Вещества, поворачивающие плоскость поляризации проходящего через них света, называются оптически активными. К их числу принадлежат некоторые кристаллы, например кварц, очень многие органические соединения. Среди последних особенно важное значение для промышленности и медицины имеют растворы сахара, виннокислотной кислоты, скипидара и др.

Свойство вращения плоскости поляризации света этими веществами объясняется наличием в них анизотропных молекул, не имеющих ни центра, ни плоскости симметрии, а в кристаллах еще и расположением молекул.

По направлению вращения плоскости поляризации различают вещества лево - и правовращающие. Например, сахар тростниковый поворачивает плоскость поляризации вправо, а сахар свекловичный - влево.

Угол поворота плоскости поляризации прямо пропорционален

числу молекул вещества на пути поляризованного света.

Если оптически активное вещество растворено в неактивном растворителе /в воде/, то угол  $\varphi$  поворота плоскости поляризации прошедшего через раствор луча пропорционален длине пути  $L$  и концентрации раствора  $C$  :

$$\varphi = [\alpha] C L, \quad \text{Г/}$$

где  $\alpha$  - коэффициент, называемый удельным вращением.

Удельным вращением называется величина численно равная углу поворота плоскости поляризации при распространении луча на расстоянии в 1 м в растворе с концентрацией  $\frac{1 \text{ кг}}{\text{м}^3}$ .

Удельное вращение имеет размерность:

$$[\alpha] = \frac{\text{ГРАД} \cdot \text{М}^3}{\text{КГ} \cdot \text{М}} = \text{ГРАД} \cdot \text{М}^2 \cdot \text{КГ}^{-1}$$

Каждая оптически активная среда имеет определенное значение удельного вращения. Угол поворота плоскости поляризации зависит от длины волны, а именно: с уменьшением длины волны света угол поворота увеличивается. Если через оптически активное вещество проходит белый поляризованный луч, то он разлагается в спектр.

Приборы, служащие для определения угла поворота плоскости поляризации, называются поляриметрами. Поляриметры, которые применяются специально для определения концентрации сахара по углу поворота, называются сахариметрами.

Отсчетная шкала их проградуирована в % концентрации сахара.

#### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

На рис. 4 изображен полутеневой поляриметр с полем зрения из трех частей. Он состоит из штатива I, камеры для поме-

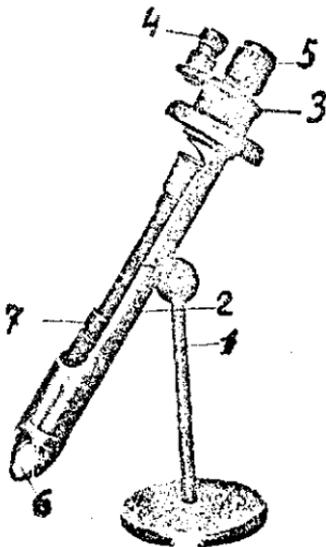


Рис. 4

щения кювет с растворами 2, кремальеры для поворота анализатора 3, отсчетной шкалы 4, отсчетной лупы 5 и источника света 6.

Цена деления шкалы в данном поляриметре  $1^\circ$ . Нониус в поляриметре, показанном на рис. 4, дает возможность производить отсчет с точностью  $0,1^\circ$ .

Принципиальная оптическая схема поляриметра показана на рис.5.

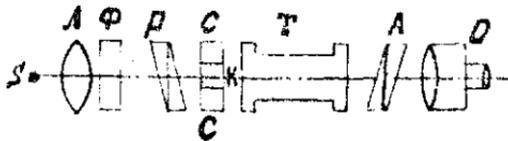


Рис.5

- где S - источник света,  
Л - конденсорная линза,  
Ф - светофильтр,  
D - призма Николя /поляризатор/  
СК - пластинка, составленная из трех частей:  
в середине - кварц, по краям - стекло.  
Т - кювета для раствора,  
А - призма Николя /анализатор/,  
O - зрительная труба.

Проследим воздействия, которым подвергается последовательно световой поток при его распространении внутри поляриметра.

Источник света  $S$  дает естественный свет. Линза  $L$  дает параллельный пучок лучей. Светофильтр  $\Phi$  пропускает лучи только одной длины волны /желтые/.

Световой поток, падающий на поляризатор  $P$  является монохроматическим, неполяризованным.

Весь световой поток, прошедший через поляризатор, будет полностью поляризованным. Электрический вектор в нем колеблется в определенной плоскости  $OP$  /рис.6/.

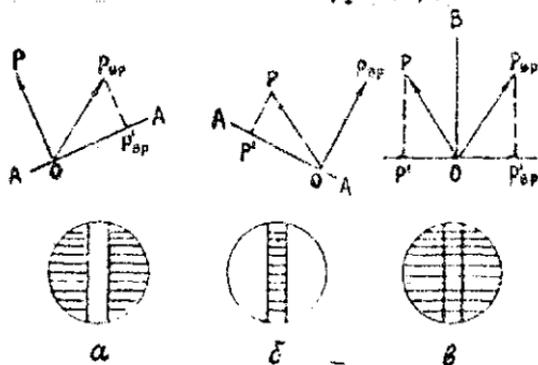


Рис. 6

Одна часть светового потока пройдет затем сквозь кварцевую пластинку  $K$  /рис.5/, которая вырезана из кристалла так, что оптическая ось в ней перпендикулярна основанию пластинки. Кварцевая пластинка как оптически активная среда повернет плоскость поляризации проходящего сквозь нее света. Новое положение плоскости колебаний электрического вектора этого потока обозначим через  $OP_{вр}$ .

Вторая часть светового потока пройдет через оптически неактивные стеклянные пластинки  $C$  /рис.5/. Поэтому плоскость колебаний электрического вектора в них сохраняет прежнее

направление  $OP$ . Следовательно, световой поток, выйдя из пластинки СКС, оказывается неоднородным в том смысле, что его средняя и крайние части в поляриметре с тремя частями поля зрения поляризованы в разных плоскостях. Эти плоскости остаются между собой небольшой угол, который зависит от толщины кварцевой пластинки.

Стеклянные пластинки по толщине подбираются такими, чтобы в них поглощалось столько же света, сколько теряется на обычное поглощение в кварцевой.

Таким образом, назначение пластики СКС состоит в том, что она превращает плоско поляризованный световой поток в два или три потока (поляризованных в плоскостях), составляющих между собой некоторый угол.

В некоторых типах поляриметров для этой цели используют другие приспособления /полутеневой анализатор и др./.

Рассмотрим вначале случай, когда в кювете  $T$  нет оптически активного раствора. Тогда световой поток проходит кювету  $T$ , не изменяя положения плоскости поляризации и затем попадает на анализатор. Интенсивность каждой части светового потока после выхода из анализатора будет зависеть, как уже отмечалось, от взаимной ориентации плоскости колебаний электрического вектора в каждом из них и главного сечения  $AA$  анализатора /рис.6/.

Если на рис.6 длина векторов  $OP$  и  $OP_0$  выражают величину амплитуды колебаний вектора в световом луче до анализатора, то величина проекций этих векторов на главное сечение  $AA$  анализатора будут выражать соответственно амплитуды колебаний этого вектора после анализатора.

Та часть светового потока, в которой плоскость колебаний электрического вектора перпендикулярна плоскости главного сечения анализатора, не пройдет через анализатор /проекция амплитуды равна нулю/ и соответствующий ей участок поля зрения будет полностью затемнен.

Рис.6а соответствует случаю, когда часть светового потока, на пути которого была стеклянная пластинка, не проходит.

Рис.6б - когда часть светового потока, на пути которого была кварцевая пластинка, не проходит.

Изменяя положение главного сечения анализатора /что достигается поворотом анализатора около продольной оси/, можно пропускать сквозь анализатор, или задерживать то одну часть светового потока, то другую.

При этом будет меняться освещенность соответствующих участков поля зрения.

Если же анализатор установить в такое положение /рис. 6в/, что главное сечение его будет перпендикулярно биссектрисе  $OB$  угла  $POC_{ар}$ , то обе части светового потока будут ослаблены анализатором в одинаковой степени и все поле зрения будет одинаково затемнено.

Такое положение называется установкой на "полутень".

Рассмотрим теперь случай, когда кювета  $T$  заполнена оптически активным раствором. Тогда весь световой поток после пластинки СКС пройдет сквозь раствор в кювете. В результате плоскости колебаний электрического вектора в каждом луче окажутся повернутыми на некоторый угол. Новые положения этих плоскостей обозначим соответственно  $OP$  и  $OP_{вр}$  /рис.7/.

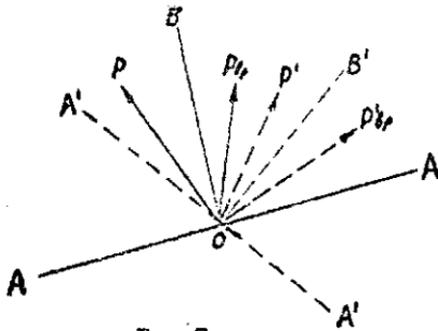


Рис.7.

Углы поворота для обоих потоков будут равны, так как длина криветы и концентрация раствора в ней везде одинаковы. Причем, углы между плоскостями колебаний вектора  $\vec{H}$  в обоих световых потоках

до криветы и после нее одинаковы:  $\text{POP}_{\text{вр}} = \text{P}'\text{O}\text{P}'_{\text{вр}}$ . Биссектриса  $\text{OB}$  угла  $\text{P O P}_{\text{вр}}$  теперь уже не будет перпендикулярной главному сечению  $\text{AA}$  анализатора в первом его положении.

Световые потоки будут ослаблены анализатором по — равному, и в результате в поле зрения уже не будет получены. Чтобы опять получить полутень, следует повернуть анализатор, установив его в таком положении  $\text{A}'\text{A}'$  /рис.7/, в котором главное сечение анализатора будет опять перпендикулярно биссектрисе  $\text{OB}'$  угла  $\text{P}'\text{O}\text{P}'_{\text{вр}}$ .

Угол, на который приходится повернуть анализатор, равен  $\varphi$ , т.е. углу, на который повернулась плоскость колебаний вектора  $\vec{E}$  светового луча при прохождении им трубки с раствором.

Таким образом, по углу поворота анализатора при установке его на полутень в случае, когда в кривете  $\text{T}$  нет раствора, и в случае, когда она заполнена оптически активным раствором, можно определить угол, на который поворачивается плоскость поляризации света при прохождении его через раствор оптически активного вещества.

§ 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

Исходя из формулы /1/

$$\varphi = [\alpha] c L$$
 получим для удельного вращения зависимость

$$[\alpha] = \frac{\varphi}{cL} \quad /2/$$

Следовательно, для определения  $[\alpha]$  достаточно определение угла  $\varphi$  поворота плоскости поляризации раствором известной концентрации " $c_n$ " при заданной длине кюветы  $L$ .

Этот угол вычисляется по формуле

$$\varphi = \varphi_n - \varphi_0$$

где:  $\varphi_0$  и  $\varphi_n$  положения анализатора, отсчитываемые по шкале при установке его на нуль соответственно в случае, когда в кювете  $T$  нет раствора, и в случае, когда она заполнена раствором известной концентрации.

Расчетная формула для определения удельного вращения будет иметь следующий вид:

$$[\alpha] = \frac{\varphi_n - \varphi_0}{c_n L} \quad /3/$$

Неизвестную концентрацию сахара в растворе можно определить по формуле /2/

$$c = \frac{\varphi}{[\alpha] L} \quad /4/$$

где:  $\varphi$  - угол поворота плоскости поляризации раствором неизвестной концентрации  $c_x$ .

В данном случае угол  $\varphi$  вычислят, исходя из данных опыта, по формуле:

$$\varphi = \varphi_x - \varphi_0,$$

где:  $\varphi_x$  положение анализатора, отсчитываемое по шкале,

при установке его на полутень, когда кювета заполнена раствором концентрации  $C_x$ .

Расчетная формула для  $C_x$  будет

$$C_x = \frac{\varphi_x - \varphi_0}{[\alpha] L} \quad /5/$$

Безличины  $L, C_n$  задаются, безличины  $\varphi_0, \varphi_n, \varphi_x$  находятся при выполнении эксперимента.

Для определения  $[\alpha]$  и  $C_x$  необходимо:

I. Наполнить кюветы соответственно дистиллированной водой, раствором известной и неизвестной концентрации.

Если в кювете обнаружится пузырек воздуха, его нужно устранить. При повороте кольца зажима трубки не следует делать усилия, чтобы не сломать кювету и не вызвать в стекле напряжения, которые делают его оптически активным.

2. Включить источник света. Его не следует подвигать близко к переднему концу прибора, чтобы не лопнула линза.

3. Поместить кювету с дистиллированной водой в камеру поляриметра и расплющить ее по оси прибора.

4. Сфокусировать при необходимости окуляр зрительной трубы на отчетливое видение линии раздела в поле зрения.

5. Установить анализатор в положение, когда нуль нониуса совпадает с нулем шкалы.

6. Повернуть анализатор по часовой стрелке и найти такое его положение, когда все поле зрения будет одинаково затемнено, т.е. положение "полутень". Эту операцию повторить несколько раз, чтобы убедиться, что установка на полутень произведена правильно.

7. Сделать отсчет по лимбу шкалы и нониусу на поляриметре. Результаты отсчета записать в таблицу.

Измерения повторить несколько раз /не меньше 5/, пока результаты отсчетов будут отличаться не больше чем на одно-два деления нониуса.

8. Затем поместить в камеру поляриметра поочередно кивету с раствором известной и неизвестной концентрации и для каждой из них повторить операции и измерения, указанные в пунктах 5,6,7.

9. Вычислить удельное вращение и содержание сахара в растворе неизвестной концентрации.

10. Вычислить погрешности измерений.

№ п/п	$\varphi_0$ в град.	$\Delta\varphi_0$ в град.	$\varphi_n$ в град.	$\Delta\varphi_n$ в град.	$\varphi_x$ в град.	$C_n$ в кг/м <sup>3</sup>	$\Delta C_n$ в кг/м <sup>3</sup>	$L$ в м.	$\Delta L$ в м.
1									
2									
3									
4									
5									
Сред. знач.									

#### § 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Какова природа света?
2. Что представляет собой естественный свет?
3. Какой свет называется поляризованным?
4. Чем отличается поляризованный свет от естественного?
5. Каково устройство и назначение призмы Николя?
6. Какие вещества называются оптически активными?
7. Что такое удельное вращение вещества?
8. Начертить оптическую схему поляриметра и указать назначение каждого элемента в ней.
9. На чем основан принцип измерения угла поворота плоскости колебаний электрического вектора поляризованного света на полутеневом поляриметре?

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА ДЛЯ  
ИЗУЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

§ I. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения в проектируемой конструкции или деталях машины необходимой прочности **нужно** иметь данные о распределении в них напряжений.

Эти данные можно получить путем теоретического расчета, используя теорию упругости или сопротивление материалов.

Однако ввиду встречающихся трудностей математического характера из общих уравнений теории упругости не всегда возможно удовлетворить запросы практики. Поэтому при решении некоторых задач приходится обращаться к различным экспериментальным методам, позволяющим опытным путем получить необходимые данные о распределении напряжений в проектируемой конструкции.

Одним из экспериментальных методов изучения напряжения является поляризационно-оптический метод исследования.

Если деформации происходят в пределах выполнимости закона Гука, то этот метод называется методом фотоупругости, если же имеют место иластические деформации — то методом фотопластичности.

I. ПРИРОДА СВЕТА. ЕСТЕСТВЕННЫЙ И ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ.

Свет, согласно волновой теории, представляет собой поперечные электромагнитные волны. В каждой точке, через которую проходит световая волна, возбуждается электрическое и магнитное поля, напряженности которых  $/ \vec{E} \text{ и } \vec{H} /$  меняются со вре-

меняем по синусоидальному закону. Векторы этих напряженностей перпендикулярны между собой и перпендикулярны к направлению распространения волны (Рис. I)

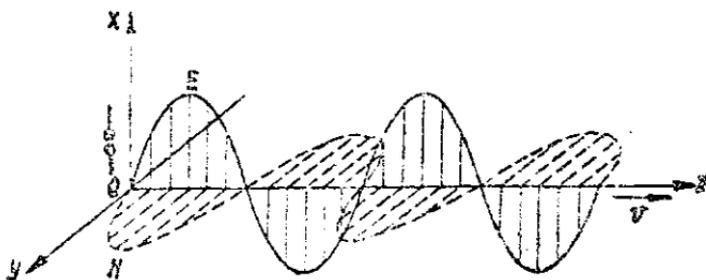


Рис. I.

Для характеристики светового колебания принято брать направление колебания электрического вектора, который и обуславливает световые ощущения глаза и все основные действия света на вещество.

Световые волны возникают в результате определенных процессов, происходящих в атомных и молекулярных системах, играющих роль "вibrаторов", "осцилляторов" — источников световых импульсов. В каждом самом малом по размерам реальном источнике света содержится огромное число таких "осцилляторов", "оси" которых направлены в пространстве хаотично. Поэтому в световом луче электромагнитные колебания не упорядочены, так как совершаются в различных направлениях.

Свет, в котором в одинаковой мере присутствуют поперечные колебания всех направлений, называется естественным светом.

Естественный свет дают раскаленные твердые тела, жидкост-

ли и газы при высоких давлениях /сплошной непрерывный спектр/, возбужденные молекулы /полосатый спектр/ и раскаленные одноатомные пары и газы /линейчатый спектр/.

В последнем случае колебания отдельных световых монохроматических волн упорядочены, но беспорядочное наложение отдельных линий друг на друга дает естественный свет.

Однако, некоторыми приемами можно колебания в каком-либо направлении устранить. В таком случае от светового источника можно получить частично или полностью упорядоченные световые колебания.

Свет, направления колебаний в котором упорядочен, называется поляризованным.

В физике различают три вида поляризованного света: плоско /или линейно/ поляризованный свет, у которого колебания электрического вектора происходят в одной плоскости; циркулярно /по кругу/ и эллиптически поляризованный свет — когда конец электрического вектора описывает круг или эллипс /рис.2./

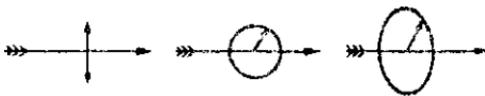


рис. 2.

## 2. Изотропные и анизотропные среды.

Все реальные тела природы разделяются на изотропные и анизотропные. У изотропных тел физические характеристики не изменяются в зависимости от направления их определения. У анизотропных тел они изменяются в зависимости от направления.

Тела, характеризующиеся показателем преломления, постоянным во всех направлениях, называются оптически изотропными. К этой группе веществ относятся все аморфные тела /стекло, смолы/ и кристаллы кубической сингонии / $AgCl$ ,  $AgBr$  и др./.

В кристаллах средних сингоний /гексагональной, тригональной и тетрагональной или квадратной/ показатель преломления остается постоянным только в одном направлении, называемом оптической осью кристалла. В других направлениях для одного и того же направления распространения света имеется две величины показателей преломления, а значит и две волны. Анализ этих волн показывает, что они поляризованы и колебания в них совершаются в двух взаимно перпендикулярных направлениях /рис.3/.

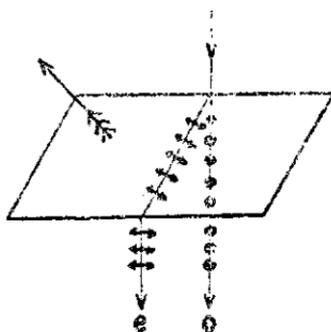


Рис. 3.

Так как свойства кристаллической среды зависят от направления, то распространение волн, колебания которых совершаются в разных направлениях, происходит с разной скоростью. Поэтому, в кристаллах средних сингоний /одноосных кристаллах/ происходит двойное лучепреломление. Тела, обладающие двойным лучепреломлением, называются оптически анизотропными. При двойном лучепреломлении одна волна распространяется с одинаковой скоростью по всем направлениям в кристалле и соответствующий ей показатель преломления  $n_0$  имеет постоянную величину.

Луч, не отклоняющийся при нормальном падении, или, если он падает наклонно, отклоняющийся с показателем преломления  $n_o$ , не зависящим от угла падения, называется обыкновенным лучем.

Другой, переменный показатель преломления  $n_e$ , соответствует волне, меняющей свою скорость в зависимости от направления. Луч, который всегда отклоняется /если только он не идет вдоль оптической оси/ и показатель которого  $n_e$  зависит от направления, называется необыкновенным лучем. Между обыкновенным и необыкновенным лучами /если они не идут вдоль оптической оси/ возникает определенная оптическая разность хода.

$$\Delta = R = d n_o - d n_e = d(n_o - n_e), \quad (1)$$

где:  $d n_o$  и  $d n_e$  — оптические пути обыкновенного и необыкновенного лучей  
 $d$  — толщина кристаллической пластинки.

### 3. Метод фотоупругости.

В 1815 году Брюкстер открыл явление искусственного двойного лучепреломления, возникающее в изотропных телах при их деформации. Временная анизотропия и изменения вследствие этого оптических свойств пропорциональны величине приложенных сил. Оценивая оптические эффекты, можно расчетным путем определить напряженное состояние упруго деформированного тела /модели/ и полученные результаты перенести на модулируемую металлическую деталь или конструкцию.

Из теории упругости известно, что в условиях плоского напряженного состояния в каждой точке деформируемого тела имеется две площадки, на которых касательные напряжения равны нулю, а действующие нормальные напряжения имеют максимальное

или минимальное значение /главные напряжения  $\sigma_1, \sigma_2$  /.

Вследствие разности напряжений по двум главным направлениям поляризованный свет, проходя через тело, разделяется в каждой точке на два луча, плоскости колебаний которых взаимно перпендикулярны и совпадают по направлению с главными напряжениями. Оба луча /обыкновенный и необыкновенный/ распространяются в деформированном теле с разными скоростями. Оптические пути обыкновенного луча /  $d n_o$  / и необыкновенного /  $d n_e$  / будут разными и поэтому между ними возникает определенная разность хода, зависящая от свойств материала и его толщины:

$$\Delta = R = d(n_o - n_e). \quad (2)$$

Если теперь с помощью поляризующей призмы /анализатора/ свести в одну плоскость колебания обоих лучей, возникает интерференция.

В точках, в которых разности главных напряжений имеют одно и то же значение, относительная разность хода также будет постоянной и равна:

$$\Delta = R = d(n_1 - n_2), \quad /3/$$

где:  $n_1$  и  $n_2$  - показатели преломления по двум главным направлениям. Точки с одинаковой разностью хода будут окрашены в один и тот же цвет. Геометрическое место таких одинаково окрашенных точек называется изохромой или полосой.

При постепенном увеличении нагрузки на модель в точках модели будет происходить изменение напряжений, и это будет сопровождаться изменением окраски. Все поле модели будет пред-

ставлять собой систему чередующихся изохром различной формы / в зависимости от формы модели, степени неравномерности напряженного состояния, характера распределение нагрузок по контуру/.

Наблюдаемые оптические эффекты возникают по следующим причинам.

Согласно закону Малюса и Араго /1810/ интенсивность света, прошедшего анализатор, пропорциональна квадрату косинуса угла между главными сечениями поляризатора / P / и анализатора / A /:  $J = J_0 \cos^2 \alpha$ . В случае скрещенных поляризатора и анализатора свет через анализатор не проходит, он гасится. Однако, если после поляризатора свет проходит модель, а затем анализатор, то интенсивность света /монохроматического/, вышедшего из анализатора, будет оцениваться более сложной зависимостью вида

$$J = A^2 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\pi \Delta}{\lambda}, \quad /4/$$

где:  $A$  - амплитуда световых колебаний до прохождения ими модели,

$\alpha$  - угол между направлением колебаний поляризованного луча и одним из главных напряжений / $\sigma_1$  или  $\sigma_2$  /.

Анализ зависимости /4/ показывает, что при определенных условиях интенсивность света, прошедшего систему поляризатор - модель - анализатор, может обратиться в нуль, т.е. произойдет полное гашение света. Это может иметь место в следующих случаях:

1. При  $\alpha = 0$  или  $90^\circ$ , т.е. когда направление колебаний поляризованного луча совпадает с направлением одного из главных напряжений.

2. При  $\Delta = m\lambda$ , где  $m = 1, 2, 3, \dots$ , т.е. когда разность хода равна целому числу волн.

3. При  $\Delta = 0$ , т.е. тогда, когда  $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$  /особые точки/.

В первом случае все точки поля модели, в которых одно из главных напряжений совпадает с плоскостью колебаний поляризованного луча, будут темными. Слияясь, они дают систему темных линий, называемых изоклинами. При синхронном вращении поляризатора и анализатора будет выявляться новая система темных линий - изоклин. Значит, изоклины являются геометрическим местом точек с одинаковыми углами наклона главных напряжений. Вращая поляризатор и анализатор от фиксированного положения /горизонтального или вертикального/ до  $180^\circ$  /через  $5, 10^\circ$ /, можно получить все поле изоклин, а значит определить направления главных напряжений по всему полю деформированной модели.

Во втором случае, когда  $\Delta = m\lambda$  интенсивность света обращается в нуль /  $\sin \frac{\pi \Delta}{\lambda} = 0$  /. В тех же точках, где  $m = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$  и т.д. интенсивность света достигает максимального значения /  $\sin \frac{\pi \Delta}{\lambda} = 1$  /. Все поле модели будет покрыто системой светлых и темных полос - изохром.

Ввиду того, что освещенность точек, в которых направления главных напряжений совпадают с направлением колебаний световых волн / $\alpha = 0$  или  $90^\circ$ / не зависят от разности хода,

поле изоклин будет налагаться на поле изохром /полос/.

\* /рис.4/. При наложении изоклинического поля на изохроматичес-

\* Рисунки 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 помещены в конце данной работы.

кое, изоклины видны тем отчетливей, чем больше интенсивность цветной окраски. Для устранения изоклин используется свет, поляризованный по кругу.

Вергейм /1854/ установил связь между механическими величинами и оптической разностью хода

$$\Delta = R = cd(\sigma_1 - \sigma_2), \quad /5/$$

где  $C$  - оптическая постоянная, зависящая от материала модели.

Из этой зависимости /закона фотоупругости/ следует, что для нахождения разности напряжений необходимо измерить оптическую разность хода  $\Delta$  и оптическую постоянную материала  $C$ .

Из закона фотоупругости следует, что изохрома есть геометрическое место точек с постоянной величиной разности главных напряжений  $\sigma_1 - \sigma_2$ . Так как максимальное касательное напряжение

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \quad /6/$$

то изохрома является геометрическим местом точек, имеющих одну и ту же величину максимальных касательных напряжений.

Учитывая, что при интерференции условие максимума определяется зависимостью

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad /7/$$

уравнение (5) представим в следующем виде:

$$m\lambda = cd(\sigma_1 - \sigma_2), \quad /8/$$

Откуда 
$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{m\lambda}{2cd} = m\tau_0. \quad /9/$$

В этой зависимости  $m$  - порядок полосы интерференции, а  $\tau_0 = \frac{\lambda}{2ca}$  - цена полосы материала, зависящая от длины волны применяемого света  $\lambda$  / материала модели  $c$  / и ее толщины  $d$  /.

Зная  $m$  и  $\tau_0$ , можно найти  $\tau_{max}$  в любой точке напряженной модели.

## § 2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА.

Получение поляризованного света в различного типа установках достигается за счет отражения света /зеркальные установки/, преломления света /установки со столой стеклянных пластинок/, поляризационных призм, изготовленных из анизотропных кристаллов /Николя, Аренса, Глава-Томсона, Воллостона/ и с помощью искусственных поляризаторов - поляроидов. Наиболее совершенными являются установки, в которых используются призм и поляроиды. Они дают более интенсивный линейно поляризованный свет, высокую степень поляризации, наибольшую равномерность поляризации, а применение поляроидов позволяет с малым числом линз /или без них/ получать большое рабочее поле и производить исследования на моделях больших размеров.

Рассмотрим принципиальную схему поляризационной установки, дающей возможность получить линейно и циркулярно поляризованный свет.

Основными частями всякой поляризационной установки являются источник света  $S$ , поляризатор  $P$ , пластинки в "четверть волны"  $Q$  /анализатор  $A$  и регистрирующее устройство, /фотоаппарат, фотоэлемент/. Если оси поляризатора и анализатора параллельны, то свет от источника проходит через систему не задерживаясь /поглощения незначительное/.

Это можно видеть на рис.5. Если же они скрещены /P и A/, то свет через систему не проходит и на экране наблюдается темный фон /рис.5б/. Такая схема называется обычным или скрещенным полярископом. Для получения циркулярно поляризованного света /кругового полярископа/ в схему после поляризатора и перед анализатором вносятся специальные кристаллические пластинки, именуемые пластинками в "четверть волны" /изготавливаемые из слюды, гипса и др. материалов/. С их помощью линейно поляризованный свет превращается в циркулярно поляризованный, а затем снова в линейно поляризованный свет. Пластинки в четверть волны устанавливаются так, чтобы плоскость колебаний падающего света составляла угол  $45^\circ$  с главными плоскостями пластинок /рис.6/. Теперь свет, пройдя поляризатор /P/, поляризуется в вертикальной плоскости. После прохождения первой пластинки в четверть волны / $Q_1$ / он превращается в циркулярно поляризованный свет /поле C/, а после прохождения второй пластинки / $Q_2$ / снова превращается в линейно поляризованный свет, с колебаниями в первоначальной плоскости.

Введением второй пластинки в четверть волны достигается прежний по величине сдвиг фаз, но уже в обратном направлении. Конечная разность фаз при установке двух пластинок будет равна нулю. Анализатор, скрещенный с поляризатором будет задерживать проходящий через систему свет.

Теперь, если в поле C поместить исследуемую модель, конечный сдвиг фаз в системе, вызывающий интерференцию световых волн, будет зависеть только от величины сдвига фаз, созданной исследуемой пластинкой.

Иногда предпочтительнее иметь на экране светлый фон. Это можно достигнуть, если при скрещенных поляризаторе и анализаторе установить параллельно оптические оси обеих пластинок в четверть волны /при повороте их под углом  $45^\circ$  к плоскости поляризатора/. Тот же результат получается, если оптические оси поляризатора и анализатора параллельны, а пластинки в четверть волны -- скрещены. В обоих случаях анализатор пропускает максимум света. Такая схема полярископа называется полярископом со смешанной установкой.

В поляризационно-проекционной установке ИПУ-7 /рис. 7 ИПУ/ используется параллельный пучок света. Источником света могут служить накаливаемые лампы, специальные лампы ПРК, СВДЛ, СЛК, равной мощности /5/. Важно, чтобы источник был минимальных размеров. Осветитель имеет револьверную головку с набором светофильтров, дающих возможность выделять в спектре ртути свет трех длин волны: 4358; 5461; 5780 /С/. Между лампой и конденсором /К/ установлены теплофильтры из стекла СЭС-14, поглощающие инфракрасные лучи. В качестве поляризатора /Р/ и анализатора /А/ используются николи, пластинки в "четверть" волны / $Q_p$  и  $Q_a$ / изготовлены из слюды /розовый мусковит/. Для регулировки фокусировки используется линза /Л/, а для фиксации изображения модели /М/ применяется фотокамера /Ф/ или экран с матовым стеклом. Нагружение модели осуществляется универсальным прессом с реверсом /П/, дающим возможность растягивать, сжимать или изгибать образец до нагрузок в 500 кг.

Лабораторный практикум предусматривает проведение следующих упражнений.

## § 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 1. Определение направлений главных напряжений

В упражнении требуется построить изоклины напряженной модели в виде диска. Для этого поместить диск из оптически чувствительного материала /вис-холмита/, в рабочее поле /поле М/ поляризационной установки. Включить источник естественного света.

Для получения плоского полярископа отвести в сторону пластинки в четверть волны  $Q_p$  и  $Q_A$ . Поляризатор поставить на  $0^\circ$  по шкале поляризатора, анализатор на  $90^\circ$ . Нагрузить модель при помощи пресса до нагрузки в I кг. На экране, на фоне красочной картины изохром, появятся темные места в тех точках модели, где одно из главных напряжений совпадает с  $0^\circ$  по шкале поляризатора.

Один из студентов прикладывает лист прозрачной бумаги к экрану и соединяет главной линией темные места изображения модели. Полученная темная линия соответствует изоклине параметра  $0^\circ$ .

Второй студент поворачивает синхронно поляризатор и анализатор на  $180^\circ$ . Записывается 2-я изоклина, третья и т.д. /до  $180^\circ$ /. В этом случае будет получено все поле изоклин деформированной модели.

Потом студенты меняются местами и повторяют опыт.

Примерный вид картины изоклин показан на рис. 6.

### 2. Определение цены полосы материала на круглом диске

Для определения цены полосы необходимо получить изохромы. Чтобы исключить искажения картины изохром за счет наложения изоклин, необходимо ввести в систему полярископа

пластинки в четверть волны  $Q_p$  и  $Q_A$ . Поляризатор и анализатор ставят на  $C^0$  /оптические оси параллельны/.

Определяют цену полос, на основании формулы /9/:

$$\tau_0 = \frac{\tau_{max}}{m} \quad /10/$$

Для вычисления  $\tau_{max}$  в центре круглого диска используется зависимость теории упругости:

$$\tau_{max} = K \frac{4P}{\pi d B} \quad /11/$$

где:  $P$  - внешняя нагрузка в Н ,

$d$  - толщина диска в м,

$B$  - диаметр диска в м,

$K = 50$ , коэффициент, показывающий во сколько раз сила давления прессы на модель больше веса использованных гирь. Все эти данные находятся опытным путем.

Уравнение преломляет в монокристаллическом свете, подбирая светофильтр, при котором наблюдается наиболее четкая картина полос /кзокром/.

Порядок полос  $m$  определяют 2-я способами:

1-способ Нагружают модель настолько медленно, чтобы можно было считать количество образовавшихся светлых полос в центре диска / в ненагруженном состоянии 0, потом 1, 2, 3/.

Опыт повторяют несколько раз.

2-способ Записывают картину образовавшихся после нагрузки полос. Порядок полосы устанавливают простым счетом от нулевой полосе до центра. Для диска нулевая полоса совпадает с контуром /рис.9/. Цифры на рисунке показывают порядок полос.

Цену полосы подсчитывает по формуле:

$$\tau_0 = \frac{\tau_{max}}{m} = K \frac{4P}{m\pi dD} \quad /12/$$

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО КАСАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ / $\tau_{max}$ / В ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКЕ НА МОДЕЛЯХ БАЛКИ И ФЕРМЫ

Модели балки и фермы сделаны из того же материала, что и диск, поэтому цена полосы  $\tau_0$  известна и надо найти только порядок полосы  $m$

Устанавливают модель балки в прессе, как указано на рис. 10 и подсчитывают порядок полосы в 3-х произвольных точках 1-м способом, указанным в упражнении 2. Расчет проводится по формуле:

$$\tau_{max} = m\tau_0.$$

Аналогично поступают с моделью фермы /рис. II/.

Кроме описанных 3-х задач на данной установке можно решать еще целый ряд вопросов:

1. Определять распределение напряжений на контуре.
2. Строить траектории главных и касательных напряжений.
3. Определять главные и касательные напряжения и т.д.

§ 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Какова природа естественного света?
2. Чем отличается поляризованный свет от естественного?
3. Какие виды поляризованного света различают?
4. Какие тела являются оптически изотропными? оптически анизотропными?
5. Как возникает двойное лучепреломление?

6. В чем заключается метод фотоупругости?
7. Дать объяснение появлению изоклин и изохром.
8. Вывести формулу для  $\tau_{\max}$  из закона фотоупругости Вертгейма.
9. Как определяется в данной работе цена полос  $\tau_0$  ?



Рис. 4

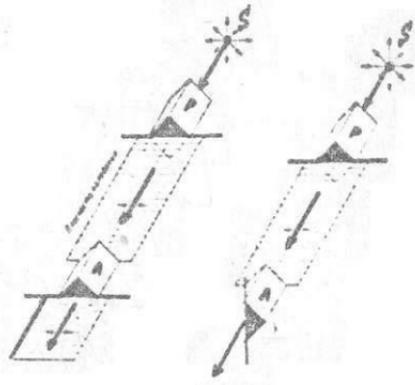


Рис. 5

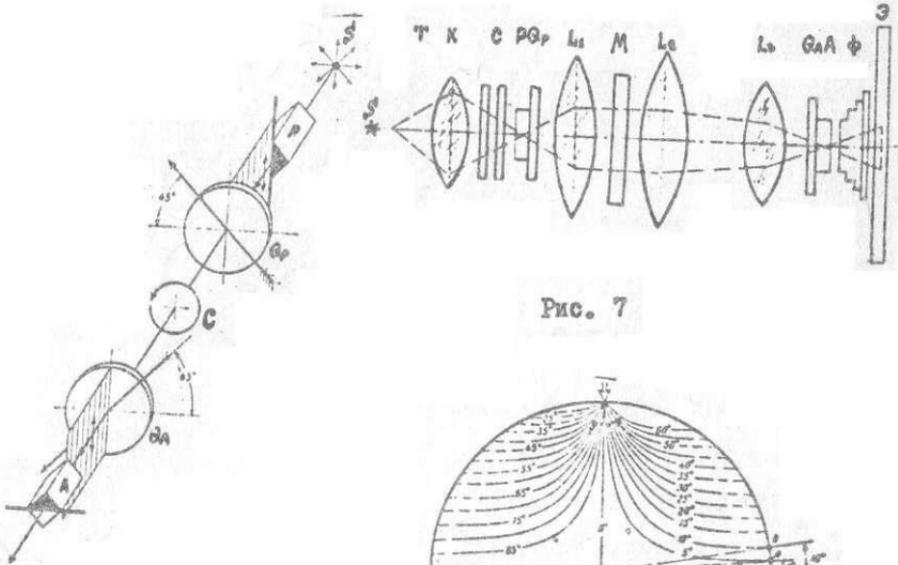


Рис. 7

Рис. 6

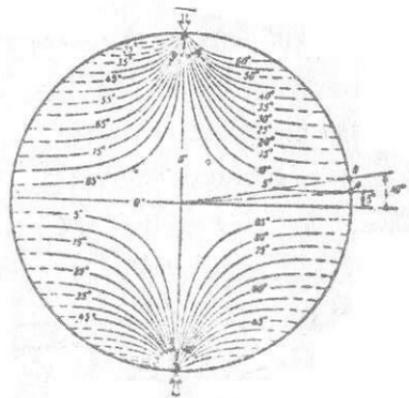


Рис. 8

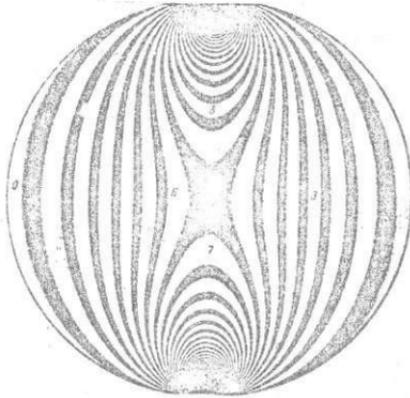


Рис. 9

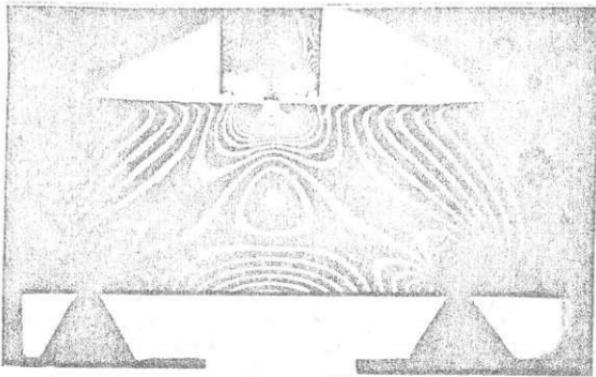


Рис. 10

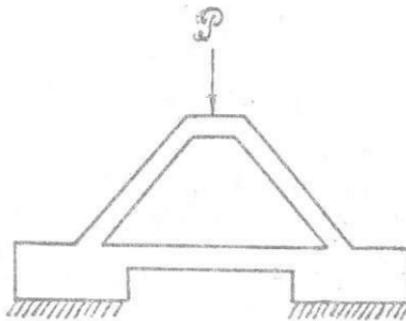


Рис. 11

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 43

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА ПРИЗМЫ

#### И ДИСПЕРСИИ ПРИЗМЫ.

Приборы и принадлежности: призма, гониометр, источник света  
(лампа дневного света )

#### § I. Теоретическое введение

Если луч света переходит из одной среды в другую, то на границе раздела этих сред он претерпевает преломление. При преломлении света выполняются следующие законы:

1. Падающий и преломленный лучи и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости.

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для данных двух сред есть величина постоянная и называется относительным показателем преломления второй среды относительно первой ( рис. I )

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{12}. \quad (1)$$

Если луч падает из пустоты в данную среду, то



Рис. I.

коэффициент преломления данной среды относительно пустоты называется абсолютным показателем преломления. Показатель преломления зависит от длины волны

падающего света. Поэтому ( когда не оговорено особе ) табличные величины показателя преломления даются для желтой линии натриевого света.

Законы преломления света дают возможность построить ход луча через призму.

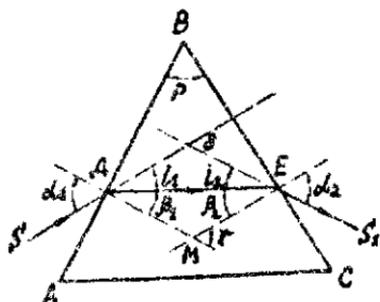


Рис.2.

Пусть ABC есть сечение трехгранной призмы плоскостью, перпендикулярной боковым ребрам призмы. На рисунке 2 изображён ход монохроматического луча через призму. Для этого луча угол  $P$  является преломляющим углом призмы. Пусть луч  $S$  падает на грань AB призмы под углом  $\alpha_1$ , на ней он преломится и, согласно законам преломления, отклонится в сторону основания призмы, так как угол падения больше угла

преломления. Встретив вторую грань BC под углом падения  $\beta_2$ , луч вторично преломится, отклонившись при этом снова в сторону основания призмы и выйдет из призмы под углом преломления  $\alpha_2$ , в направлении  $ES_2$ . Из построения видно, что:

$$\begin{aligned} i_1 &= \alpha_1 - \beta_1, \\ i_2 &= \alpha_2 - \beta_2, \\ \delta &= i_1 + i_2, \\ \gamma = P &= \beta_1 + \beta_2. \end{aligned} \quad (2)$$

$\delta$  и  $\gamma$  - внешние углы треугольника.

Угол между продолжением падающего луча и продолжением преломленного луча  $ES_1$  называется углом отклонения призмы ( $\delta$ ). Найдём его из приведённых выше соотношений. Он равен:

$$\delta = i_1 + i_2 = \alpha_1 - \beta_1 + \alpha_2 - \beta_2. \quad (3)$$

Угол  $\delta$  имеет наименьшее значение тогда, когда угол падения луча на грань AB  $\alpha_1$  и угол выхода луча  $ES_2$   $\alpha_2$  равны между собой (рис.2)

Но если  $\alpha_1 = \alpha_2$ , то и  $\beta_1 = \beta_2$ , так как

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} \quad \text{и} \quad n_{21} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2}.$$

Следовательно угол наименьшего отклонения

$\delta = 2\alpha_1 - 2\beta_1$ , но угол  $2\beta_1$  равен в данном случае углу  $P = \gamma = 2\beta_1$  (P и  $\gamma$  как углы с соответственно перпендикулярными сторонами) и поэтому

$$\delta_{\min} = 2\alpha_1 - P. \quad (4)$$

Из последних соотношений имеем  $2\alpha_1 = P + \delta_{\min}$ , откуда

$$\alpha_1 = \frac{P + \delta_{\min}}{2}; \quad (5)$$

$$A = \frac{P}{2}. \quad (6)$$

Подставляя в (1), получим:

$$n = \frac{\sin \frac{P + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{P}{2}}. \quad (7)$$

Полученная формула дает возможность, зная преломляющий угол призмы  $P$  и угол наименьшего отклонения  $\delta_{\min}$ , определить показатель преломления стекла призмы  $n$ .

### § 2. Описание прибора.

Угол наименьшего отклонения можно определить при помощи гониометра. Гониометр состоит из горизонтального диска, имеющего градусные деления (лимб), неподвижно укрепленной трубы - коллиматора, зрительной трубы, которую можно поворачивать вокруг трехгранной призмы, помещенной на подставке. При вращении зрительной трубы ее положение можно фиксировать с помощью градусной шкалы лимба и нокиуса, который вращается вместе с трубой. Цена деления нокиуса  $1'$  (рис. 3).

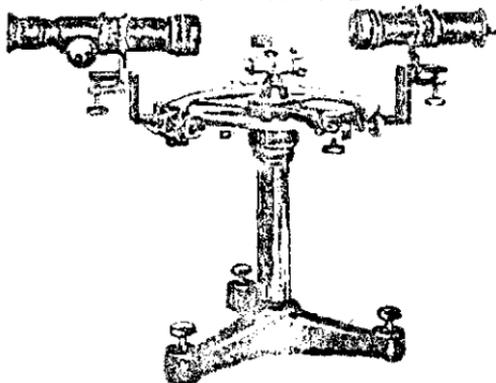


Рис. 3.

### § 3. Порядок выполнения работы.

#### I. Определение показателей преломления красной, жёлтой и синей линий спектра.

Установить гониометр так, чтобы цель коллиматора находилась у источника света. Зрительную трубу расположить по одной прямой с коллиматорной. При помощи окуляра, винтов зрительной трубы и ее поворота в горизонтальной плоскости добиться совмещения нити зрительной трубы с серединой чёткого изображения цели. Записать отсчет по лимбу и по нониусу с точностью до  $1'$  ( $\alpha_0$ ). Определить исходное положение системы не менее трех раз.

Затем, установив призму на столе гониометра так, чтобы биссектриса преломляющего угла ( $< 45^\circ$ ) была перпендикулярна входящему лучу, поворачивать зрительную трубу в сторону основания призмы пока не появится чёткий спектр. Но для вычисления показателя преломления стекла призмы необходимо определить угол наименьшего отклонения  $\delta_{min}$  (рис.2). Для этого необходимо вращать призму так, чтобы спектр перемещался к кузовому положению ( $\alpha_0$ ). Это приведет к уменьшению  $\delta$ . При некотором положении призмы наступит момент, когда спектр остановится и при дальнейшем вращении ее в прежнем направлении, начнет перемещаться в другую сторону. Положение, при котором спектр начинает двигаться в другую сторону (точка возврата) и дает угол наименьшего отклонения спектра ( $\delta_{min}$ ).

Поворачивая зрительную трубу последовательно, установить ее нить на красную, желтую и голубую линии и записать отсчеты по лимбу и нониусу ( $\alpha_k$ ,  $\alpha_m$ ,  $\alpha_r$ ). При правильной установке зрительной трубы каждая линия должна только доходить, но не переходить через нить зрительной трубы. Опыт повторить 3 раза.

Углы наименьшего отклонения  $\delta_{\min}$  для каждой линии определяется как разность двух отсчетов, сделанных при положениях трубы:

1. Когда нить трубы наведена на середину изображения цели, полученный без призмы ( $\alpha_0$ ).

2. Когда нить трубы наведена на определенную линию ( $\alpha_k$ ,  $\alpha_m$ ,  $\alpha_r$ ).

Полученные данные занести в таблицу

№ пп	$\rho$	$\alpha_0$	$\delta\alpha_0$	$\alpha_k$	$\delta\alpha_k$	$\alpha_m$	$\delta\alpha_m$	$\alpha_r$	$\delta\alpha_r$
	45°								
Среднее значения									

Пользуясь средними значениями из таблицы вычисляют  $\delta_{\min}$  для красного, желтого и голубого цветов.

По формуле 
$$n = \frac{\sin \frac{\rho + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{\rho}{2}}$$
 находят

показателя преломления для каждого цвета.

Показатель преломления для желтой линии сравнить с табличными данными.

## 2. Определение дисперсии стеклянной призмы.

Зависимость показателя преломления от длины волны называется дисперсией света.

Дисперсию вещества характеризуют разности показателей преломления, соответствующих краям видимого спектра ( для голубого и красного цвета)

$$n_F - n_C$$

Для характеристики призмы ( или дифракционной решетки ) вводится понятие угловой дисперсии призмы

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} \quad ( 8 )$$

и относительно дисперсии

$$\frac{n_F - n_C}{n_D - 1} \quad ( 9 )$$

Угловая дисперсия показывает на сколько изменяется угол отклонения лучей при изменении длины волны на 1.

В упражнении требуется определить

$$n_F - n_C, \quad \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}$$

и среднюю угловую дисперсию

$$D = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda},$$

где:  $\Delta \Psi = \alpha_F - \alpha_c,$   
 $\Delta \lambda = \lambda_F - \lambda_c,$   
 $\lambda_F = 4860 \text{ \AA}, \lambda_c = 6563 \text{ \AA}.$

Данные для определения указанных величин взять из таблицы.

Для призмы угловая дисперсия будет иметь знак минус, т.к. с увеличением длины волны угол отклонения уменьшается.

#### § 4. Расчет погрешности.

Погрешности для каждого показателя преломления определить аналитическим методом по формуле:

откуда 
$$\frac{\Delta n_i}{n_i} = \frac{1}{2} \Delta \delta \cdot \operatorname{ctg} \frac{F+\delta}{2}$$

$$\Delta n_i = \frac{1}{2} n_i \Delta \delta \cdot \operatorname{ctg} \frac{F+\delta}{2}, \quad (8)$$

где:  $\Delta \delta = \Delta \alpha_c + \Delta \alpha_i$  выражается в радианах,

$\Delta \alpha_c$  - погрешность начального положения щели,

$\Delta \alpha_i$  - положение определенной линии (красной, желтой, синей), полученное статистическим методом.

Ответ представить в виде:

$$n_c = (\dots \pm \dots),$$

$$n_d = (\dots \pm \dots),$$

$$n_F = (\dots \pm \dots),$$

$$n_F - n_c = \dots,$$

$$\frac{n_F - n_c}{n_d - 1} = \dots,$$

$$D = \dots$$

§ 5. Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте основные законы геометрической оптики.
2. Как связаны показатель преломления среды и скорость распространения света в ней?
3. Начертите ход монохроматического луча через призму.
4. Начертите ход белого луча через призму.
5. Выведите рабочую формулу.
6. Что такое дисперсия? Почему она возникает? Чем она характеризуется?

ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Приборы и принадлежности: универсальный фотометр ФМ-56, трансформатор на 220 вольт для включения фотометрической лампы, кюветы, которые позволяют ввести слой жидкости толщиной 5 см (расстояние между дном кюветы и пробкой), колбы с растворами медного купороса и дистиллированной водой, твердые тела, микрометр, сосуд для промывки кювет, фильтровальная бумага для просушки кювет.

§ I. Теоретическое введение.

Свет, проходя через любую среду, поглощается. Поглощение света связано с преобразованием в веществе энергии светового излучения в другие виды энергии. С точки зрения электронной теории взаимодействие света и вещества сводится к взаимодействию электромагнитного поля световой волны с атомами и молекулами вещества.

Электроны, входящие в состав атомов, могут колебаться под действием переменного электрического поля световой волны. Часть энергии световой волны затрачивается на возбуждение электронов в атомах и другие формы энергии, например, в энергию теплового движения. Поэтому поглощение света сопровождается нагреванием тела.

Поглощение света можно описать с энергетической точки зрения, но входя в детали механизма взаимодействия

световых волн с атомами и молекулами поглощающего вещества.

Пусть через однородное вещество распространяется пучок параллельных монохроматических лучей длиной волны  $\lambda$ . Разделим этот слой на ряд элементарных слоев толщиной  $dL$ . (рис. 1а).

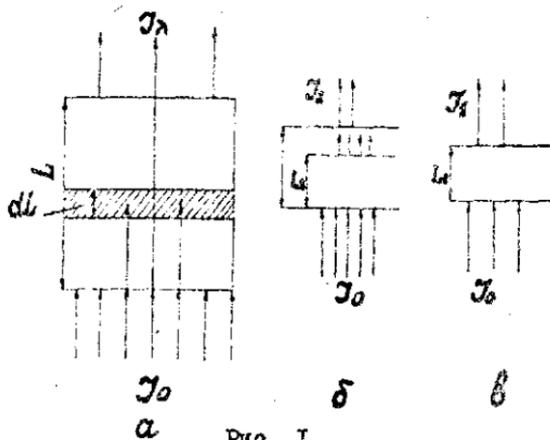


Рис. 1

При прохождении света через такой слой, интенсивность света  $J_\lambda$  ослабляется пропорционально падающему свету  $J_0$  и толщине слоя  $dL$ :

$$-dJ_\lambda = K_\lambda J_\lambda dL. \quad (1)$$

Коэффициент  $K_\lambda$  определяется свойствами поглощающего вещества и называется коэффициентом поглощения. Интегрируя уравнение (1) в пределах от 0 до L, получим закон Бугера:

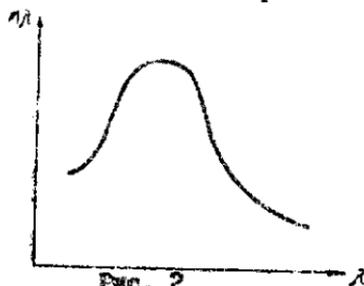
$$\frac{dJ_\lambda}{J_\lambda} = -K_\lambda dL, \\ \ln J_\lambda - \ln J_0 = -K_\lambda L, \quad (2)$$

откуда

$$J_{\lambda} = J_0 e^{-K_{\lambda} L} \quad (3)$$

При этом выводе потерями света при отражении от границ поглощающей среды пренебрегаем. Свет различных длин волн поглощается различно, поэтому коэффициент поглощения  $K_{\lambda}$  зависит от длины волны (рис. 2). Зависимость коэффициента поглощения от длины волны называется спектром поглощения.

Ослабление света может происходить также за счет рассеяния световой энергии. Однако в случае прозрачных тел рассеянием можно пренебречь.



Если поглотителем является растворенное в жидком или твердом растворителе исследуемое вещество, то поглощение будет тем больше, чем больше молекул поглощающего вещества свет встречает на своем пути. Поэтому в случае небольших концентраций, коэффициент поглощения пропорционален концентрации  $C$

$$K_{\lambda} = K_{1\lambda} C,$$

где  $K_{1\lambda}$  - коэффициент пропорциональности, также зависящий от длины волны  $\lambda$ .

Подставляя значение  $K_{\lambda}$  в формулу (3), получим закон Бугера-Бейера:

$$J_{\lambda} = J_0 e^{-K_{1\lambda} C L} \quad (4)$$

Формулу ( 2 ), переходя к десятичным логарифмам, можно представить в следующем виде

$$- 2,5 \lg \frac{I_{\lambda}}{I_0} = K_{\lambda} l.$$

Величина  $D = - \lg \frac{I_{\lambda}}{I_0}$  называется оптической

плотностью, тогда

$$K_{\lambda} = \frac{2,3 D}{l}. \quad ( 5 )$$

§ 2. Описание прибора

Универсальный фотометр ФМ-56 предназначен для измерения коэффициентов пропускания ( или оптической плотности ) твердых и жидких прозрачных сред, измерения коэффициентов яркости светорассеивающих образцов и их блеска. Кроме того, прибор может быть использован в качестве сравнительного микроскопа и для измерения коэффициентов отражения.

Фотометр состоит из следующих основных узлов (рис.3)

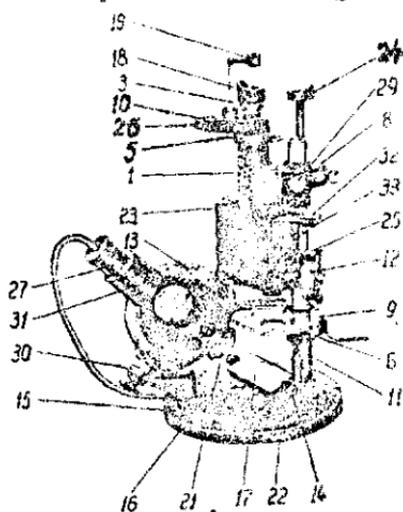


Рис. 3

фотометрической головки I, револьверного диска со светофильтрами 26, штативе II, 22 предметного столика 9, плоского зеркала I7 и осветителя I3.

В корпусе фотометрической головки I расположены оптические детали ( объективы, призмы и т.д.) и механизмы диафрагмы. Барабаны I2, показывающие степень раскрытия

измерительных диафрагм, вынесены по обе стороны корпуса. На барабанах имеется 2 шкалы. На одной шкале нанесены коэффициенты светопропускания ( черные цифры) ,на второй оптической плотности ( красные цифры).

С помощью индексов 25 производится отсчет через лулы 22. Шкалы барабанов освещаются осветителем 23. Окуляр, служащий для наблюдения поля зрения, имеет кольцо 3, с помощью которого производится установка на резкость линии раздела поля зрения, и эбонитовый наглазник 18, который обеспечивает совпадение зрачка глаза наблюдателя со зрачком выхода прибора. Имеется также глухой наглазник 24, который может закрывать неработающий глаз. Наглазник 24 устанавливается в удобное положение и закрепляется винтом 5. Выдвижная луна 19 служит для рассматривания изображений отверстий с целью проверки их совмещения и заполнения светом ( при настройке прибора).

В верхней части фотометрической головки находится револьверный диск 26, в котором закреплены одиннадцать светофильтров. Светофильтры включаются поворотом диска 26, причем, номер светофильтра, находящегося в рабочем положении, определяется по номеру, появляющемуся в окошке 10. На стойке II перемещается вертикально предметный столик и закрепляется в нужном положении винтом 6.

Для крепления образцов применяются призмы на столике 9. Плоское зеркало 17 служит для направления пучков света во вход отверстия фотометрической головки. Конденсоры осветителя смонтированы в цилиндры 21. В цилиндрах имеются

вырезы, куда вставляются матовые рассеиватели, создающие равномерно светящийся фон для наблюдений. Из II светофильтров 3 светофильтров ( I-8) делят видимую область спектра примерно на равные участки шириной 40 мкм . Три последних светофильтра ( 9-II) делят видимую область спектра на 3 части: красную, зеленую и синюю.

Светофильтры можно охарактеризовать эффективной длиной волны, указывающей, что данный светофильтр приблизительно эквивалентен по своему действию идеально-монохроматическому светофильтру, пропускающему излучение с длиной волны  $\lambda_{эф}$  . Для светофильтров (I-8)  $\lambda_{эф}$  даны в таблице I. Окошко 10 оставлено для измерений в белом свете. Для зажигания лампы фотометра включают один из штекеров шнура в гнездо "0", другой в гнездо "8" ( 8в) трансформатора, а штекера осветителя барабанов - в гнезда "4" и "16".

Оптическая схема прибора показана на рис. 4. Два параллельных световых пучка, выходящие из отверстия, отражаясь от зеркала I, проходят через измерительные диафрагмы 3, которые являются зрачками входа прибора, объективы 4 и ромбические призмы 5. Пройдя последние световые пучки, идут под углом друг к другу и попадают на бипризму 6.

Действие бипризмы заключается в том, что она сводит два пучка к оси окуляра, причем , часть правого пучка, попадан

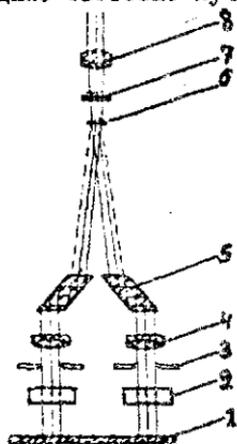


Рис. 4.

на левую половину бипризмы, создаёт яркость левой половины поля зрения. Левый пучок освещает правую половину поля. При выходе из окуляра 8, световые лучи попадают в глаз наблюдателя, который видит два совмещённых полукруга/Рис. 5/. Яркость полукругов зависит от отверстия в диафрагме, при этом интенсивности световых пучков, проходящих через кюветы 2, будут обратно пропорциональны площадям отверстий диафрагм. Между окуляром 8 и бипризмой 6 помещаются светофильтры 7.

### § 3. Порядок выполнения работы.

#### 1. Снятие спектра поглощения жидкости.

Чтобы снять спектральную характеристику раствора, поступают следующим образом. Вращением револьверного диска 26 (рис. 3) и ход лучей вводят светофильтр I. Правый барабан 12 устанавливает на отсчет "0" (по красной шкале). В правый пучок света помещают кювету с исследуемым раствором "X", а в левый пучок — дистиллированную воду (растворитель). Включают осветитель и вращением левого барабана добиваются одинаковой освещённости обеих половин поля зрения, видимых в окуляр (вращением левого барабана изменяют освещённость правой половины поля зрения). Берут не менее 3-х отсчетов и определяют среднюю оптическую плотность  $D_1$  по красной шкале.

Затем кюветы меняют местами и повторяют измерения, причем, левый барабан устанавливает на "0", а отсчеты снимают по правому. Определяют  $D_2$ . Искомую оптическую плотность  $D$  находят из выражения

$$D = \frac{1}{2}(D_1 + D_2). \quad (6)$$



## 2. Определение концентрации раствора.

С помощью универсального фотометра можно определять концентрацию вещества в растворе. Для этого нужно знать зависимость оптической плотности от концентрации раствора данного вещества в интервале длин волн, пропускаемых каким-либо одним светофильтром.

Светофильтр должен обладать наибольшей оптической плотностью  $D$  для раствора "X". Номер светофильтра с наибольшей оптической плотностью  $D$  выбирает из таблицы I.

Зависимость оптической плотности  $D$  от концентрации находят следующим образом. В одну из кювет наливает поочередно раствор известной концентрации, а в другую - растворитель и методом, описанным ранее, находят оптическую плотность. Все измерения заносят в таблицу 2. По полученным данным строят градуировочный график в координатах  $D=f(c)$ , на котором по оси абсцисс откладывают известные концентрации растворов, а по оси ординат соответствующие значения оптических плотностей (красная шкала) всех растворов. Пользуясь полученным графиком определяют концентрацию неизвестного раствора.

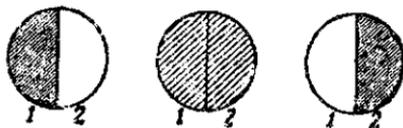


Рис. 5

Номер светофильтра

Таблица 2

D		e	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>x</sub>
D <sub>1</sub>	1					
	2					
	3					
	Ср.					
D <sub>2</sub>	1					
	2					
	3					
	Ср.					
D						

3. Определение коэффициента поглощения твердого вещества

Для определения коэффициента поглощения твердого вещества необходимо поместить две плоские пластинки толщиной  $L_1$  и  $L_2$  из одного и того же материала на путь светового пучка интенсивности  $J_0$  (рис. 1а и 1б).

Разница в оптических плотностях пластин обусловлена толщиной слоя  $L_1 - L_2$ . С помощью фотометра измеряют плотность слоя  $L_1 - L_2$ . На основании формулы (5) определяют коэффициент поглощения

$$K_\lambda = \frac{2,3D}{L_1 - L_2} \quad (7)$$

и результаты заносит в таблицу.

В работе требуется определить коэффициент поглощения нескольких материалов (плексиглас, вискомлит, целлулоид, бакелит и др.).

§ 4. Контрольные вопросы.

1. Объясните механизм поглощения света.
2. Выведите формулу Бугера.
3. Почему коэффициент поглощения света зависит от длины волны?
4. Что такое оптическая плотность?
5. Назначение универсального фотометра типа ФМ.
6. Начертите оптическую схему прибора.
7. На чём основано определение концентрации раствора?

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Приборы и принадлежности: фотоэлемент ЦГ-3 в оправе, укрепленной на рейтере, оптическая скамья, осветитель, выпрямитель, реостат, микроамперметр, вольтметр.

Теоретическое введение.

Законы внешнего фотоэффекта.

Под действием света поверхности металлов и полупроводников способны испускать электроны. Это явление называется внешним фотоэлектрическим эффектом. Сущность его объясняется квантовой теорией излучения и заключается в следующем: кванты лучистой энергии, проникая в металл, передают свою энергию электронам металла. Энергия кванта равна  $h\nu$ , где  $\nu$  — частота света,  $h$  — постоянная Планка, равная  $6,62 \cdot 10^{-34}$  дж.сек. Такими порциями свет излучается и такими же порциями поглощается.

Из уравнения Эйнштейна следует, что энергия кванта  $h\nu$  идёт на совершение работы выхода электрона из металла  $A$  и на придание ему кинетической энергии  $\frac{mv^2}{2}$ :

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2} . \quad (1)$$

Это уравнение объясняет законы внешнего фотоэффекта, открытые и экспериментально исследованные в конце XIX века профессором Московского университета Столетовым А.Г.

Энергия кванта передается какому-то одному электрону. Чем больше интенсивность света, т.е. чем больше отдельных порций энергии падает на поверхность металла в единицу времени, тем большее число электронов получает возможность вылететь из металла. Таким образом, одним из основных законов внешнего фотоэффекта является следующий:

1) Число электронов, вырываемых в единицу времени с поверхности, прямо пропорционально интенсивности падающего света.

Из уравнения (1) видно, что свет не всякой длины волны способен вырвать электрон. Чтобы наблюдался фотоэффект, необходимо выполнение неравенства  $h\nu > A$ . Если  $\nu$  мало и  $h\nu < A$ , то энергия кванта недостаточна для того, чтобы электрон мог приобрести необходимую скорость и покинуть металл. И как бы ни увеличивали интенсивность света этой длины волны, всё равно фотоэффекта наблюдаться не будет. Отсюда второй и третий законы внешнего фотоэффекта:

2) Энергия электрона, вылетевшего из металла, возрастает линейно с частотой  $\nu$  падающего света и не зависит от его интенсивности.

3) Скорость вылетевших электронов для данного металла зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности.

Для различных металлов существует своя частота  $\nu_0(\lambda_0)$ , ниже которой прекращается вылет электронов. Эта частота определяет порог фотоэффекта и называется красной границей фотоэффекта. Для большинства металлов  $\nu_0$  относится к ультра-

фиолетовой области, только для щелочных металлов  $V_0$  попадает в область видимого спектра.

### § 2. Описание прибора.

Приборы, в основе устройства которых лежит явление фотоэффекта, называются фотоэлементами. На рис. I схематически показано устройство фотоэлемента, представляющего собой герметически закрытый стеклянный баллон, из которого выкачан воздух. Светочувствительный слой металла, нанесенный на внутреннюю поверхность баллона, является катодом, анод - в виде кольца.

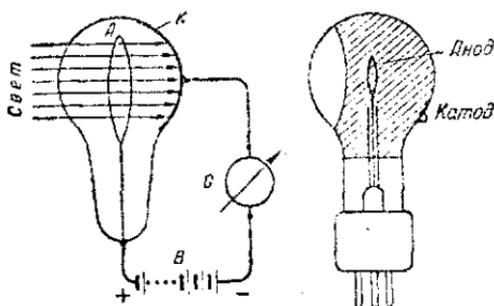


Рис. I

В зависимости от того, заполняется ли баллон фотоэлемента после предельного удаления из него воздуха инертным газом (обычно аргоном) или же не заполняется, различают фотоэлементы вакуумные и газонаполненные.

В фотоэлементе ЦГ-З, который используется в данной ра-

боте, фотокатодом является слой цезия. Баллон заполнен инертным газом ( цезиевый газонаполненный, тип 3).

При освещении фотокатода из него вырываются электроны. Если между катодом и анодом приложить некоторую разность потенциалов, то электроны, перемещаясь под действием поля от катода к аноду, создадут ток.

Важнейшими характеристиками фотозлемента являются световая и вольтамперная характеристики.

Световой характеристикой называется зависимость фототока  $I_{\phi}$  ( при заданном напряжении  $U$  на электродах фотозлемента) от светового потока  $\Phi$  :  $I_{\phi} = f(\Phi)$ .

При  $U = \text{Const}$   
 $I_{\phi} = K\Phi$ .

Коэффициент  $K$  называется интегральной чувствительностью фотозлемента - это величина фототока, появляющегося при освещении фотозлемента белым светом при световом потоке в 1 лм; размерность его  $\frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$ .

Вольтамперной характеристикой называется зависимость фототока  $I_{\phi}$  от напряжения  $U$  на электродах фотозлемента при постоянном световом потоке  $\Phi$ :  $I_{\phi} = f(U)$  при  $\Phi = \text{Const}$ .

Сначала сила тока  $I_{\phi}$  возрастает с ростом напряжения  $U$  на электродах фотозлемента. Начиная же с некоторого определенного значения  $U = U_n$  дальнейшее возрастание тока прекращается - ток достигает насыщения. Это объясняется тем, что все электроны, испускаемые катодом, достигают анода при данном значении напряжения  $U_n$ .

Зная эти характеристики необходимо на практике для правильного выбора рабочего режима фотоэлемента.

На одном конце оптической скамьи неподвижно укреплен осветитель, а на рейтере - фотоэлемент ЦГ-3.

Электрическая схема включения изображена на рис.2.

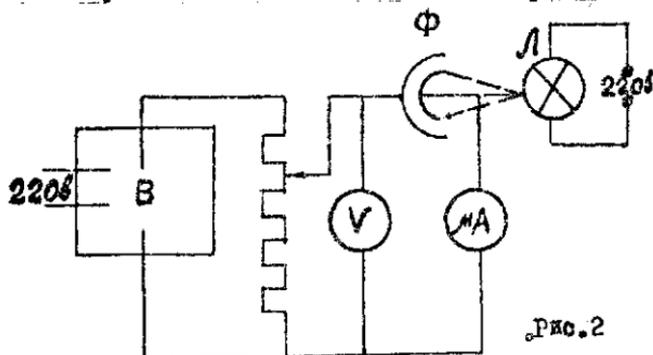


Рис.2

- где:  $\Phi$  - фотоэлемент ЦГ-3,  
 $B$  - выпрямитель,  
 $R$  - реостат, с помощью которого изменяют напряжение на электродах фотоэлемента;  
 $V$  - вольтметр, измеряющий напряжение на фотоэлементе;  
 $MA$  - микроамперметр, измеряющий фототок;  
 $L$  - лампочка-осветитель на 46 св.

При изменении расстояния между фотоэлементом и лампочкой световой поток, падающий на светочувствительный катод, различен. Его величина рассчитывается на основании следующих соображений.

Полный световой поток  $\Phi$  для точечного источника света равен

$$\Phi = 4\pi J, \quad (a)$$

где:  $\mathcal{Y}$  - сила света в международных свечах  
 $4\pi$  - телесный угол сферы в стерадианах.

Световой поток, падающий на светочувствительный катод, равен

$$\Phi' = \omega \mathcal{Y}, \quad (3)$$

а

$$\omega = \frac{S}{r^2}, \quad (4)$$

где:  $S$  - освещаемая площадь фотокатода, равная  $3 \text{ см}^2$ ;  
 $r$  - расстояние от источника света до фотокатода  
( рис.3 ).

Учитывая (4), получим:

$$\Phi' = \frac{S}{r^2} \mathcal{Y}. \quad (5)$$

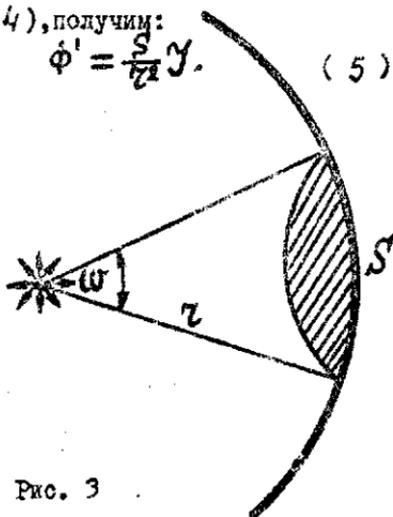


Рис. 3

### § 3. Порядок выполнения работы.

I. Познакомьтесь с установкой и, не включая её, проверьте правильность собранной схемы .



Данные опыта при снятии вольтамперных характеристик  $I_{\phi} = f(U)$  при  $\phi = \text{Const}$ .

Таблица 2

При $\tau = 10 \text{ см}$	Напряжение на фотоэлементе в вольтах	0	4	8	16	32	64	100	120	160	200
		Сила фототока в мкА									
При $\tau = 20 \text{ см}$	Сила фототока в мкА										

По данным таблиц 1 и 2 построить графики световой и вольтамперных характеристик.

§ 4. Контрольные вопросы.

1. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
2. Сформулировать законы внешнего фотоэффекта. Каково объяснение этих законов Эйнштейном?
3. Что такое работа выхода?
4. Дать определения потока световой энергии, силы света, освещенности. В каких единицах они измеряются?
5. Объяснить появление фототока насыщения.
6. Каково устройство фотоэлемента с внешним фотоэффектом?

ПРОВЕРКА ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ ФОТОМЕТРИИ С ПОМОЩЬЮ ФОТОЭЛЕМЕНТА

Приборы и принадлежности: Оптическая скамья, точечный источник света, фотоэлемент с запирающим слоем, гальванометр.

§ I. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ.

Свет представляет собой электромагнитные волны, лежащие в определенном диапазоне частот.

Зрительное /физиологическое/ ощущение, которое способен вызывать свет, попадая в глаз человека, зависит не только от количества энергии, но и от длины волны. /видимый спектр от 0,4 мк до 0,76 мк/. Восприимчивость глаза к различным участкам спектра не одинакова. Наиболее чувствителен глаз к лучам с длиной волны 0,556 мк /желтозеленая часть спектра/ и менее чувствителен к другим волнам видимого спектра. Чувствительность глаза к зеленым лучам в 320 раз больше, чем к красным, при одинаковой энергии, попадающей в глаз человека.

Чтобы сравнить световые источники по их действию на глаз человека введен специальный эталонный источник света. Этот эталон устанавливает единицу силы света, называемую международной свечой /св/. Эталонной единицы силы света является электрическая лампочка, конструкция, размеры и питание которой строго стандартизированы. Стандартный источник силы света испускает свет равномерно во все стороны.

Мощность лучистой энергии, оцениваемая по световому облучению, называется световым потоком. Если сила света источника одинакова во всех направлениях, то полный световой поток, испускаемый во все стороны, равен:

$$\Phi = 4\pi J,$$

/1/

где  $\Phi$  - световой поток,

$J$  - сила света источника в международных свечах.

Поток, идущий от источника, силой в одну свечу внутри телесного угла в один стерадиан принят за единицу светового потока. Эта единица называется люмен.

За единицу освещенности принимается освещенность, созданная потоком в один люмен, равномерно распределенный на площадке в  $1 \text{ м}^2$ . Эта единица называется люкс:

$$E = \frac{\Phi}{S},$$

/2/

где  $E$  - освещенность,

$\Phi$  - световой поток,

$S$  - освещаемая площадь.

Если источник испускает свет во все стороны неравномерно, то освещенность определяется из выражения

$$dE = \frac{d\Phi}{ds}, \quad (3)$$

где  $d\Phi$  и  $ds$  - элементарный световой поток и элементарная площадь.

Раздел оптики, занимающийся измерениями светового потока и величин с ним связанных, называется фотометрией.

Существует два основных закона фотометрии.

1. Освещенность поверхности точечным источником света изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника до освещаемой поверхности.

2. Освещенность поверхности, расположенной наклонно к световому потоку, пропорциональна косинусу угла между направлением лучей и нормалью к поверхности.

Пусть  $O$  - точечный источник света /рис.1/,  $ds$  освещаемая площадка,  $Z$  - расстояние между источником света и площадкой,  $N$  - нормаль к площадке,  $\alpha$  - угол между направлением распространения светового потока и нормалью к площадке,  $d\omega$  - телесный угол, в котором распространяется световой поток  $d\Phi$

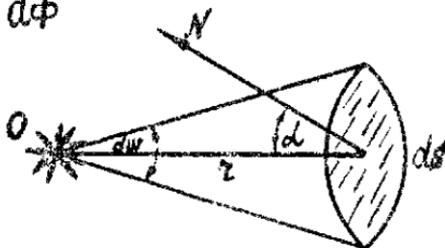


Рис. 1

Так как  $d\Phi = Y d\omega$ , а  $d\omega = \frac{ds \cos \alpha}{Z^2}$ ,  
то  $d\Phi = ds \frac{Y}{Z^2} \cos \alpha$  и освещенность

$$dE = \frac{d\Phi}{ds} = \frac{Y \cos \alpha}{Z^2}. \quad (4)$$

Если лучи падают перпендикулярно к площадке, т.е.  $\alpha = 0$ ,

то

$$E_0 = \frac{Y}{Z^2}. \quad (5)$$

При  $Y = \text{const}$  и переменном  $Z$  имеем:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\gamma_2^2}{\gamma_1^2} \quad /6/$$

Формула /6/ выражает первый закон освещенности.

При  $\gamma = \text{const}$ ,  $\tau = \text{const}$  и переменном  $\alpha$

$$E = \frac{\gamma}{\gamma_0} \cos \alpha. \quad \text{Учитывая /5/, получим:}$$

$$E = E_0 \cos \alpha. \quad /7/$$

Формула /7/ выражает второй закон освещенности.

## § 2. ОПИСАНИЕ ПИБОРА

Для измерения освещенности и других фотометрических величин применяются приборы, главной частью которых является фотоэлемент. Фотоэлементом называется устройство, в котором световая энергия преобразуется в электрическую.

Одним из них является фотоэлемент, с запирающим слоем.

Устройство такого фотоэлемента основано на явлении, впервые наблюдавшемся русским ученым, профессором Казанского университета В.А.Ульяновым в 1888 г. Оно заключается в том, что под действием света на границе полупроводника с металлом появляется электродвижущая сила.

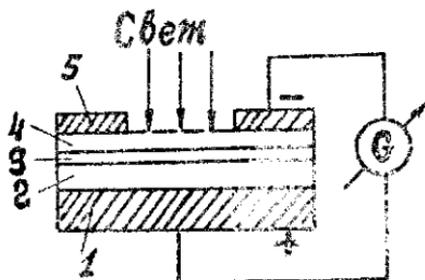


Рис. 2.

Селеновый фотоэлемент с запирающим слоем изображен на рис. 2. На железное основание I нанесен тонкий слой селена 2, а на селен - полупрозрачный слой золота 4. К золотому слою плотно прижимается металлическое кольцо 5, служащее электродом. Между селеном и слоем золота возникает промежуточный слой 3, который обладает свойством пропускать электроны только в одном направлении - от селена к золоту. От золота к селену электроны переходить не могут. Благодаря этому свойству слоя его назвали запирающим - он закрывает путь электронам в определенном направлении. Образование запирающего слоя происходит вследствие возникновения контактной разности потенциалов между контактирующими металлом и полупроводником, которые имеют различную величину работы выхода.

В данном случае при контакте золота и селена электроны из слоя селена /полупроводник/ переходят в слой золота /металл/, т.к. работа выхода электронов селена  $A_C$  меньше работы выхода электронов золота  $A_3$

$$A_C < A_3.$$

В результате этого перехода электронов возникает приконтактный слой селена практически лишенный свободных электронов. Толщина этого граничного слоя может достигать величины, значительно превосходящей длину свободного пробега электронов. Поэтому этот слой обладает очень большим сопротивлением. Если на поверхность фотоэлемента падает свет, то через полупрозрачный слой золота он попадает на селен. Электроны в селене получают дополнительную энергию и часть их переходит в слой золота, который заряжается отрицательно.

Селен, в виду недостатка в нем электронов, зарядится положительно.

В результате этого возникает фотоэлектродвижущая сила.

Если основание I и кольцо 5 замкнуть через гальванометр, то он покажет наличие тока.

Фотоэлектродвижущая сила и ток будут тем больше, чем больший световой поток падает на фотоэлемент, т.е. чем больше его освещенность:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{i_1}{i_2}, \quad (8)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  - освещенности, а  
 $i_1$  и  $i_2$  - соответствующие им токи.

На рис. 3 дан общий вид установки.

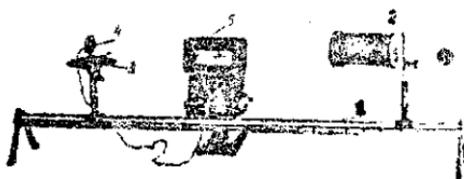


Рис. 3.

На оптической скамье I укреплена электрическая лампочка в металлическом кожухе 2. На лимбе 3, который может вращаться вокруг оси и перемещаться вдоль скамьи, находится фотоэлемент 4, соединенный с гальванометром 5.

Если при расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  от фотоэлемента до источника света стрелка гальванометра отклонилась на  $n_1$  и  $n_2$  делений, то при цене деления гальванометра равной  $a$ , силы фототоков соответственно будут равны  $i_1 = n_1 a$  и  $i_2 = n_2 a$ .

Учитывая зависимости /6/ и /8/, получим:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (9)$$

Равенство /9/ выражает первый закон фотометрии применительно к условиям нашей работы /при  $I = \text{const}$ /.

Пусть при  $I = \text{const}$  и угле падения лучей  $\alpha = \alpha_1$  стрелка гальванометра отклонилась на  $N_1$  делений, а при угле падения  $\alpha = \alpha_2 = N_2$  делений.

Т.е.  $E^I = E_0 \cos \alpha_1$  и  $E^II = E_0 \cos \alpha_2$ , то  $N^I = N_0 \cos \alpha_1$  и  $N^{II} = N_0 \cos \alpha_2$ ,

где  $N_0$  - показание гальванометра при прямом падении лучей. Из этих равенств получим:

$$\frac{N^I}{N^{II}} = \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \quad (10)$$

Равенство /10/ выражает второй закон фотометрии применительно к условиям нашей работы.

### § 5. Порядок выполнения работы.

I. Проверить первый закон фотометрии, для чего записать показания гальванометра при различных расстояниях  $z$  от фотоэлемента до источника света, один раз увеличивая, а другой - уменьшая это расстояние.

Получить не менее 7 точек.

Данные записать в таблицу I.

Таблица I.

$z$ в см. при удалении фотоэлемента от источника света	$N$ в делениях шкалы гальванометра	$z$ в см. при приближ. фотоэлем. к источнику света	$N$ в делениях шкалы гальван.	$N$ среднее при данном $z$
10				
20				
30				
:				

2. Проверить 2-ой закон освещенности, для чего установить фотозлемент на расстоянии 60 см. от источника света и, поворачивая его вокруг оси лимба, отсчитывать углы по лимбу, каждый раз отмечая показания гальванометра. Получить не менее 9-ти точек, один раз увеличивая, а другой раз уменьшая угол на  $20^\circ$ .

Данные записать в таблицу 2.

Таблица 2.

Угол падения $\alpha$ / при увеличении угла, в %	Показания гальванометра в делениях шкалы $n$	Угол падения $\alpha$ / при уменьшении угла, в %	Показания гальванометра в делениях $n$	Среднее показание гальванометра при данном угле	$\cos \alpha$
10 20 30 :					

3. По данным таблиц 1 и 2 построить графики зависимости  $n = f(\alpha)$  и  $n = f(\alpha)$ ,  $\cos \alpha = f(\alpha)$ .

Графики  $n = f(\alpha)$  и  $\cos \alpha = f(\alpha)$  построить на одних и тех же осях, взяв  $\cos 0 = n_0$ .

Сравнить графики  $n = f(\alpha)$  и  $\cos \alpha = f(\alpha)$ .

#### § 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Что такое световой поток, освещенность, единицы их измерения?
2. Сформулировать 1-й и 2-й законы освещенности.
3. Каково устройство фотозлемента с запирающим слоем?
4. Принцип действия фотозлемента.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕМЕНТА  
С ВНУТРЕННИМ ФОТОЭФФЕКТОМ ОТ ОСВЕЩЕННОСТИ

Приборы и принадлежности: фотосопротивление, источник света, мост Уитстона, люксметр, реостат, вольтметр переменного тока.

§ I. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ.

В отношении электропроводящих свойств все вещества делятся на три класса: проводники, полупроводники и диэлектрики. В металлах величина концентрации свободных электронов порядка  $10^{10^{22}}$  в  $m^3$ , поэтому сопротивление металлов электрическому току мало, порядка  $10^{-8} - 10^{-6}$  ом. м. В диэлектриках концентрация свободных электронов мала, сопротивление их электрическому току довольно значительно  $10^8 - 10^{13}$  ом. м. В полупроводниках концентрация свободных электронов порядка  $10^{16}$  в  $m^3$  и в отношении электрического сопротивления  $10^6$  ом.м/ полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Характерной особенностью полупроводников является то, что их сопротивление уменьшается под влиянием ряда физических факторов: температуры, освещения, электрического поля, примесей. К полупроводникам относятся: селен, теллур, германий, мышьяк, некоторые окислы металлов  $/SiO_2/$ , сернистые соединения  $/cdS, Br_2S_2 /$  и т.д. Увеличение электропроводности полупроводников при их освещении объясняется тем, что в полупроводниках появляется больше свободных электронов. Кванты лучистой энергии, падая

на полупроводник, передают электронам, связанным с атомами и не являющимися свободными, свою энергию. Благодаря этому электроны отрываются от атомов и пополняют запас свободных электронов. Явление увеличения электропроводности полупроводников при освещении называется внутренним фотоэлектрическим эффектом.

В отличие от внешнего фотоэффекта, заключающегося в полном отрыве и эмиссии электронов, при внутреннем фотоэффекте происходит только изменение энергетического состояния электронов, приводящее к изменению концентрации свободных носителей тока. Если внешний фотоэффект наблюдается при освещении как металлов, так и полупроводников, то внутренний фотоэффект характерен только для полупроводников и диэлектриков.

## § 2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРОВ

Фотосопротивления. Вещества, обнаруживающие внутренний фотоэффект, называются фотосопротивлениями, устройство которых схематически показано на рис. I. На стеклянную пластинку I нанесен тонкий слой полупроводника 2. На два противоположных края этого слоя наложены металлические электроды 3, с помощью которых фотосопротивление может включаться в цепь электрического тока. Фотосопротивление для защиты от повреждений помещено в чехол из пластмассы. Схема включения фотосопротивления показана на рис. I.

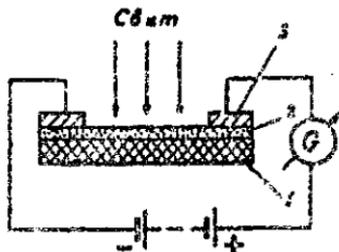


Рис. I

Если фотосопротивление не освещено, то величина сопротивления его очень большая. Эту величину называют темновым сопротивлением. Соответственно ток, проходящий через неосвещенное фотосопротивление /темновой ток/, будет очень мал. При освещении его сопротивление уменьшается и тем значительнее, чем больший световой поток на него падает.

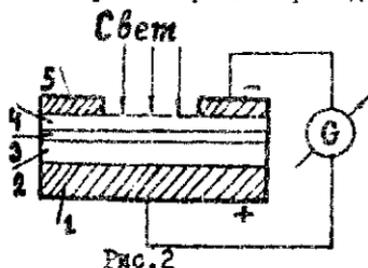
Одной из характеристик фотосопротивления является его чувствительность. Чувствительностью фотосопротивления называется отношение тока, текущего через него при освещении, к величине светового потока.

### Люксметр.

Люксметром называется прибор, с помощью которого измеряют освещенность, т.е. световой поток, приходящийся на  $1\text{ м}^2$  поверхности. Основной деталью люксметра, применяемого в данной работе, является фотозаэлемент с запирающим слоем. Устройство его основано на явлении, которое называется фотоэлектрическим эффектом в запирающем слое. Заключается оно в том, что под действием света на границе полупроводник-металл появляется электродвижущая сила. Это явление впервые наблюдал русский ученый, профессор Казанского университета В.А.Ульянин в 1888 году.

Рассмотрим это явление на конкретном фотозаэлементе, который изображен на рис.2. На стальное основание 1 нанесен слой полупроводника/селена/ 2, на слой селена - тонкий полупрозрачный слой золота 4, к золотому слою плотно прижато металлическое кольцо 5, служащее электродом. Между селеном и слоем золота возникает промежуточный слой 3, который обладает свойством пропускать электроны только в одном направлении - от селена к золоту.

От золота к селену электроны переходить не могут.



Образование запирающего слоя происходит вследствие возникновения контактной разности потенциалов между контактирующей металлом и полупроводником которые имеют различную величину работы выхода электронов.

В данном случае при контакте золота и селена электроны из слоя селена переходят в слой золота, так как работа выхода электронов селена  $A_c$  меньше работы выхода электронов золота  $A_3$ :

$$A_c < A_3.$$

В результате этого перехода электронов возникает приконтактный слой селена, практически лишенный свободных электронов. Толщина этого граничного слоя может достигать величины, значительно превосходящей длину свободного пробега электронов. Поэтому этот слой обладает очень большим сопротивлением.

Благодаря этому свойству слой его назвали запирающим; он закрывает путь электронам в одном направлении. Если селеновый слой осветить, то электроны в нем получают дополнительную энергию и перейдут в полупрозрачный слой золота. Так как здесь возникает избыток электронов, то этот слой зарядится отрицательно, а селен и стальное основание — положительно.

Это явление и используется для измерения освещенности, так как появляющаяся фотоэлектродвижущая сила тем больше, чем больше света падает на фотоэлемент. Если фотоэлемент подключить к гальванометру  $G$ , то стрелка его будет отклоняться,

так как в цепи пойдет ток. Шкала гальванометра градуируется в люксах.

Расположение и схема включения приборов показаны на рис.3. Электрическая лампочка  $L$  помещена в металлический кожух с отверстием, в котором с внешней стороны может укрепляться фотосопротивление  $\Phi_c$  или люксметр /они смонтированы на одной панели/. Реостатом  $R$  регулирует напряжение на лампе, благодаря чему меняется освещенность фотосопротивления. Наибольшая освещенность будет в том случае, когда на лампу подано ее номинальное напряжение. Сопротивление фотозлемента измеряют местом Уитстона (М.У.).

Освещенность фотосопротивления  $\Phi_c$  при различных напряжениях на лампе измеряют люксметром, для чего, передвигая фотосопротивление, заменяют его фотозлементом люксметра.

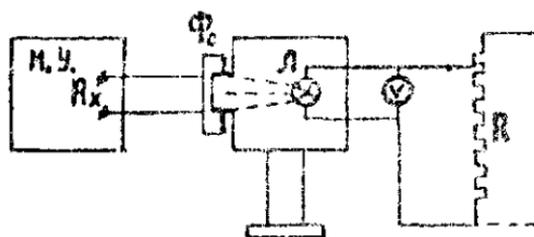


Рис. 3

### § 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему.
2. Измерить темновое сопротивление  $\Phi_c$ . Результат записать в виде значащего числа, умноженного на 10 в  $n$ -ой степени /например:  $4,8 \times 10^8$  ом/.

3. Включив лампочку в сеть, измерить сопротивление не при различных напряжениях /получить 5-7 точек/. Измерения проводят один раз увеличивая, а другой раз уменьшая напряжение на лампе.

4. Передвинуть фотосопротивления и на его место поместить фотоэлемент люксметра. Записать показания прибора люксметра при тех же значениях напряжений на лампе. Данные занести в таблицу I.

Напряжение на лампе в вольтах	Величина сопротивления $R_C$ в омах		Среднее сопротивление при данной освещенности	Освещенность в люксах.
	при увеличении напряжения	при уменьшении напряжения		
1. $U = 0$				
2. $U = 25$				
3. $U = 50$				
4. $U = 75$				
и т.д.				

5. По полученным данным построить график зависимости сопротивления  $R_C$  от освещенности.

#### § 4. Контрольные вопросы:

1. Чем отличаются полупроводники от проводников и диэлектриков?
2. Что называется внутренним фотоэффектом?
3. Каково устройство фотосопротивления и фотоэлемента?
4. Как объяснить увеличение электропроводности и фотосопротивления при освещении?
5. Какие еще факторы влияют на электропроводность полупроводников?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАРЯДА ИОНА ВОДОРОДА

Приборы и принадлежности: газовый вольтметр, источник напряжения, ключ, амперметр, реостат, секундомер, масштабная линейка и барометр.

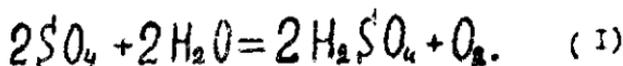
§ I. Теоретическое введение.

Молекулы солей, кислот и щелочей состоят из положительных и отрицательных ионов. Например, молекула серной кислоты  $H_2SO_4$  состоит из положительного иона  $H_2^{++}$  и отрицательного иона  $SO_4^{-}$ . Ионы связаны между собой электрическими силами притяжения. Отделение ионов друг от друга требует значительной энергии. Энергии теплового движения даже при высоких температурах недостаточно для такого разделения.

Молекулы солей, кислот и щелочей, растворяясь в воде, диссоциируют, т.е. распадаются на ионы. Диссоциация молекул в воде обусловлена значительным ослаблением электрических сил притяжения ионов в растворенном веществе. В этом случае энергии теплового движения молекул вполне достаточно для разделения положительных и отрицательных ионов. Как молекулы, так и ионы растворенного вещества находятся в хаотическом движении.

Если опустить в водный раствор серной кислоты металлические электроды и соединить их с источником напряжения, то под действием электрического поля хаотически изрежсающиеся ионы приобретут направленное движение вдоль поля.

Положительный ион водорода  $H_2^+$  будет двигаться к катоду (отрицательному электроду), которому передает свой заряд. У катода будет выделяться свободный водород. Отрицательный ион  $SO_4^-$  будет двигаться к аноду, отдаст ему свой заряд и вступит в химическую реакцию с водой. В результате этого у анода будет выделяться свободный кислород. Реакция у анода будет проходить по уравнению:



В водном растворе солей, щелочей, кислот могут переноситься электрические заряды, т.е. через раствор может проходить электрический ток.

Растворы, через которые проходит электрический ток, называются электролитами.

При прохождении тока через электролит составные части химически сложного вещества выделяются на электродах. Подобный процесс называется электролизом.

При электролизе водного раствора серной кислоты каждый ион водорода несет с собой один положительный элементарный заряд. Величину этого заряда  $e$  можно определить, если за определенное время установить число  $N$  подведших к катоду ионов водорода и общий заряд  $Q$ , перенесенный ими. Тогда

$$e = \frac{Q}{N}. \quad (2)$$

§ 2. Описание прибора.

При электролизе водного раствора серной кислоты на катоде выделяется водород, на аноде - кислород. Водород и кислород можно собрать отдельно с помощью газового вольтметра (рис. I). Газовый вольтметр представляет собой

U - образную стеклянную трубку В, оба колена которой снабжены кранами С и

Д. В каждое колено вставлены электроды А и К.

Объемы обоих колен градуированы на кубические сантиметры. Газовый вольтметр имеет трубку с шаровидным расширением в ее верхней части. Вольтметр включен в цепь постоянного

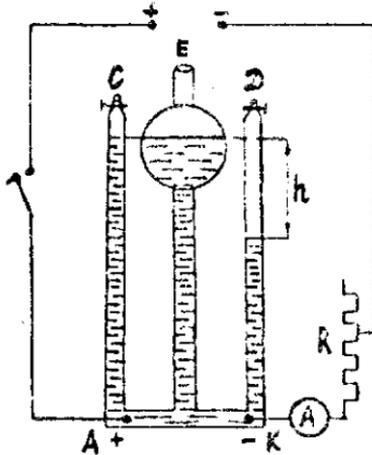


Рис. I

напряжения. Ток регулируется реостатом R и измеряется амперметром.

В процессе электролиза в коленах вольтметра собираются выделяющиеся газы. Вытесняемый ими электролит переходит в расширение трубки E.

В процессе выполнения опыта измеряют ток  $I$ , время прохождения тока  $t$  и объем водорода  $V$ , выделившегося в коленах с вставными катодами (K).

Число прошедших ионов водорода

$$N = 2 n_0 V_0, \quad (3)$$

где:  $n_0$  - число молекул водорода, содержащихся в  $1 \text{ м}^3$  при нормальных условиях ( $T_0 = 273^\circ\text{К}$ ;  $P_0 = 760 \text{ мм рт.ст.}$ ,  $n_0 = 2,7 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{м}^3}$ )  $V_0$  - объем выделившегося водорода при нормальных условиях.

Коэффициент 2 соответствует числу атомов водорода, входящих в молекулу водорода.

Рассмотрим уравнение состояния водорода в условиях опыта и при нормальных условиях (параметры газового состояния при нормальных условиях снабжены индексом "нуль"). Тогда получим зависимости:

$$PV = \frac{m}{M} RT, \quad (4)$$

$$P_0 V_0 = \frac{m}{M} R T_0. \quad (5)$$

Деля почленно (4) на (5) и решая найденное соотношение относительно  $V_0$ , получим

$$V_0 = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0} V. \quad (6)$$

Расчетная формула (2) для определения заряда иона водорода с учетом (3) и (6) примет следующий вид:

$$e = \frac{\mathcal{E} T P_0}{2 n_0 T_0 P V}. \quad (7)$$

где  $\mathcal{U}$  - сила тока в вольтметре,  
 $t$  - время прохождения тока,  
 $V$  - объем выделившегося водорода в  $\text{м}^3$ ,  
 $T$  - абсолютная температура водорода,  
 $P$  - давление водорода в условиях опыта.  
 $P_0$  и  $T_0$  - соответственно давление и температура при нормальных условиях.

Давление водорода  $P$  в условиях опыта равно сумме давлений атмосферы "Н" и столба жидкости (разность уровней раствора в открытой трубе  $E$  и колене, содержащем водород) за вычетом давления насыщенных паров воды  $f$ , т.е.

$$P = H + h - 0,9f. \quad (8)$$

Коэффициент 0,9 учитывает, что пары находятся не над чистой водой, а над раствором серной кислоты небольших концентраций. Все величины равенства (7) должны быть выражены в системе СИ.

### § 3. Порядок выполнения работы.

1. Соединяют приборы по схеме (рис.1).
2. Измерить барометрическое давление, температуру раствора, записывают данные в таблицу.
3. Произвести измерение времени, в течение которого при токе 0,8а выделится  $25 \text{ см}^3$  водорода. Для этого:

- а) производят пробное включение и, замыкая рубильник и ключ, устанавливают движком реостата ток 0,2а;
- б) открывают краны С и Д, наблюдая за удалением газов из колена вольтметра. Краны С и Д необходимо закрыть в тот момент, когда раствор в трубке Е достигает уровней кранов. Выключить ток;
- в) включить ключ и одновременно запустить секундомер. Ток поддерживает постоянным по величине. Кислород, накапливающийся в колене С, необходимо во время опыта выпускать;
- г) когда выделится 25 см<sup>3</sup> водорода, размыкают цепь и останавливают секундомер;
- д) с помощью линейки измеряют высоту  $h$ .
- е) заносят в таблицу результаты измерений, относящиеся к первому опыту.

4. В последующем последовательно повторить все операции для тока в 0,2а.

Таблица

О п ы т		1	2
$\rho$			
$\xi_{\text{ср}}$			
$V \text{ см}^3$ (выделенный за время $t$ )			
$T$			
$T_0$			
Давление	По барометру $H_0$		
	столба жидкости $h$ насыщенных паров воды	17,5 мм рт.ст.	17,5 мм рт. ст.
Заряд иона водорода			

$$\begin{aligned} 1 \text{ мм. рт. ст.} &= 133 \text{ н/м}^2 \\ 1 \text{ мм. водяного столба} &= \\ &= 9,81 \text{ н/м}^2 \end{aligned}$$

#### § 4. Определение погрешностей.

1. Находят в таблицах физических величин значение, соответствующее температуре опыта.
2. Подсчитывают по формуле (8) для каждого опыта давление ( $P$ ) водорода.
3. Для каждого опыта рассчитывают по формуле (7) величину заряда иона водорода.
4. Для одного из опытов определяют относительную и абсолютную погрешности измерения заряда иона водорода. Относительную погрешность рассчитать по формуле:

$$\frac{\Delta e}{e} = \frac{\Delta J}{J} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta P_0}{P_0} + \frac{\Delta n_0}{n_0} + \frac{\Delta T_0}{T_0} + \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta V}{V}.$$

5. Результат измерения заряда представить в виде  $e = (\dots \pm \dots)$ .
6. Сравнить среднее значение результата измерений с табличным результатом ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  кулон).

#### § 5. Контрольные вопросы.

1. Чем обусловлена диссоциация молекул в воде?
2. Вывод рабочей формулы.
3. Цель и ход данной работы.
4. Устройство и принцип действия газового вольтметра.
5. Каково значение заряда иона водорода?

КАЧЕСТВЕННЫЙ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ  
СПЛАВОВ С ПОМОЩЬЮ СТИЛОСКОПА

Приборы и принадлежности: стилоскоп лабораторный переносной (СЛП-1), генератор активизированной дуги, анализируемые образцы.

§ 1. Теоретическое введение.

Спектральным анализом называется физический метод определения химического состава вещества путем изучения его спектра. Этот метод основан на том, что каждый химический элемент обладает характерным, присущим только ему, спектром.

Оптические спектры возникают в результате излучения атомом энергии. Атом может поглощать и излучать энергии только вполне определенными порциями, квантами, различными для разных атомов. Энергия кванта, поглощенного или испущенного атомом, пропорциональна частоте света, т.е. равна  $h\nu$ , где  $h$  - постоянная Планка ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  дж.сек). Энергетические состояния, в которых может находиться атом, прямо изображать графически в виде параллельных линий, называемых энергетическими уровнями. Расстояние между двумя линиями равно разности энергий двух соответствующих состояний атома. Эти состояния, характеризуемые определенными значениями энергии, называются стационарными.

Рассмотрим простейший атом с одним валентным

электронем ( атом водорода).

Энергетические уровни для атома водорода изображены на рис. I

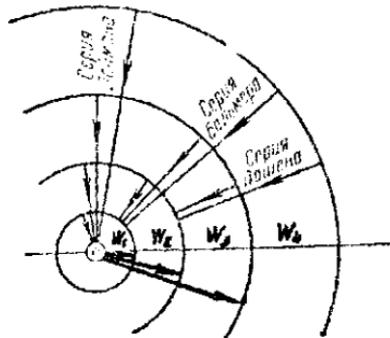


Рис. I

В состоянии, соответствующем низшему энергетическому уровню, которое называется нормальным, атом обладает минимальной энергией. При сообщении атому дополнительной энергии он переходит из нормального состояния в другое состояние с большей энергией. Это новое состояние называется возбужденным.

Если  $W_1$  - энергия невозбужденного атома, а  $W_2$  - энергия возбужденного атома, то разность  $W_2 - W_1$  соответствует энергии, поглощенной атомом. Возбужденное состояние атома неустойчиво. В этом состоянии атом может находиться очень короткое время ( $10^{-8}$ - $10^{-5}$  сек), после чего он возвращается в невозбужденное состояние с энергией  $W_1$ . При этом атом излучает квант энергии, равный

$$h\nu = W_2 - W_1. \quad (1)$$

Частота испущенного света

$$\nu = \frac{W_2 - W_1}{h} . \quad (2)$$

Так как в атомах возможны и другие переходы электрона:

с 3-го энергетического состояния на второе, первое, и т.д., то излучение атомов будет содержать несколько линий. Совокупность частот (или длин волн), излученных атомами какого-нибудь элемента, образует спектр данного элемента. Спектр, полученный от светящихся тел, называется спектром испускания.

По спектру испускания вещества можно произвести как качественный, так и количественный спектральный анализ.

Задача качественного спектрального анализа - определить, какие элементы входят в состав вещества.

Задача количественного анализа состоит в определении процентного содержания элементов, входящих в состав исследуемого вещества. Оценка количественного содержания при спектральном анализе производится по интенсивности (яркости) спектральных линий. Чем больше концентрация данного элемента в образце, тем интенсивнее будут его линии в спектре.

Для осуществления спектрального анализа необходимо:

1. Превратить анализируемое вещество в газообразное и возбудить свечение газа.
2. Разложить излучение в спектр.
3. Осуществить регистрацию спектра.

4. Произвести по спектру качественную или количественную оценку содержания элементов в анализируемом образце.

§ 2. Описание прибора.

Для перевода вещества из твердого состояния в газообразное применяют электрическую дугу или искру переменного тока. Анализируемый образец используется в качестве одного из электродов.

Вещество электродов испаряется и поступает в пламя дуги, где под воздействием высокой температуры, достигающей  $5000-9000^{\circ}\text{C}$ , атомы вещества возбуждаются и излучают свет. Для получения спектра свет, излучаемый возбужденным газом пропускают через спектральный аппарат, основной частью которого является призма.

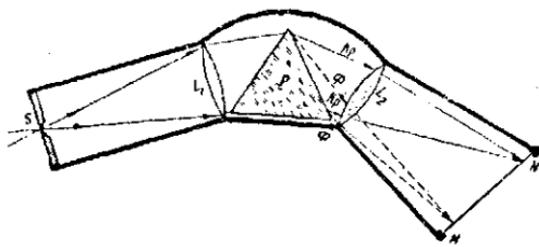


Рис. 2

Принципиальная схема спектрального аппарата изображена на рис. 2. Свет от исследуемого вещества, в большинстве случаев содержащий волны различных длин, направляется на щель  $S$ . Между щелью прибора и стеклянной призмой  $P$  помещается коллиматорный объектив  $L_1$ . Его назначение направлять на призму параллельный пучок света от каждой точки щели. Для этого объектив устанавливается так, чтобы щель находилась в его фокальной плоскости. Встречая на своем пути призму  $P$ , параллельный пучок света, благодаря явлению дисперсии, раскладывается на ряд монохроматических (одноцветных) пучков, имеющих различные направления.

Каждый монохроматический пучок представляет собой пучок параллельных лучей одной длины волны. За призмой помещается другой объектив  $L_2$  (намерный), он собирает в своей фокальной плоскости падающие на него параллельные монохроматические пучки. В результате этого возникает ряд действительных изображений щели (ряд узких цветных линий), совокупность которых образует спектр  $MM'$ . В точке  $N$  собраны красные лучи, в точке  $M$  собраны фиолетовые лучи, остальные - между точками  $N$  и  $M$ . В фокальной плоскости намерного объектива или за ней помещается приемник излучения. Приемником излучения может быть глаз или фотографическая пластинка. Если спектр наблюдается визуально, то прибор снабжается окуляром, который выполняет функцию дуги.

Такие приборы называются спектро스코пами. К ним относятся стилоскоп и стилометр. Если спектр регистрируется при помощи фотопластинки, то прибор снабжается фотокамерой с кассетой и называется спектрографом.

Принцип действия стилоскопа

С помощью стилоскопа СЛН-1 можно произвести качественный и количественный анализ сталей (рис.3).

Между двумя электродами, одним из которых является анализируемый объект, а другим-так называемый, постоянный электрод стилоскопа ( стальной стержень или медный диск),зажигают дугу, вследствие чего междуэлектродный промежуток заполняется света-

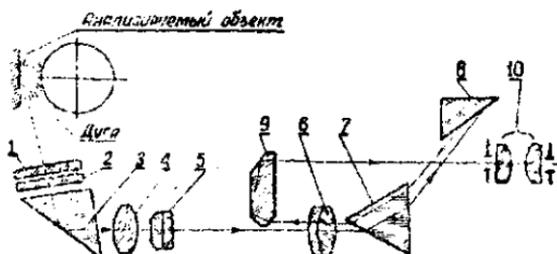


Рис. 3

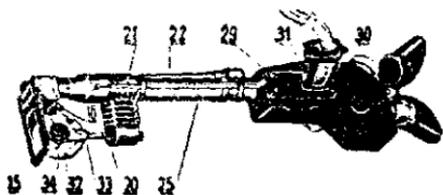
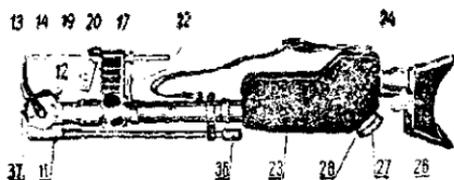


Рис. 4,5.

щимися парами материала электродов. Свет от дуги направляется на спектральный аппарат через конденсор и узкую щель.

Свет от дуги, пройдя через защитные стекла 1 и 2 направляется прямой 3 на конденсор 4, затем на щель 5 спектроסקопа. Свет, прошедший через щель, падает на объектив 6, который превращает расходящийся пучок в параллельный и направляет его на диспергирующие призмы, где происходит разложение белого света в спектр. Большой катет призмы 8 позеребра:отражаясь от него, лучи вновь проходят в обратном направлении призмы 3 и 7, чем достигается увеличение дисперсии прибора. Затем снова, пройдя объектив 6, пучок лучей превращается в сходящийся и попадает на призму 9, которая направляет его через промежуток между призмами 7 и 8 в окуляр 10, через который и наблюдается линейчатый спектр.

Линейчатый спектр содержит линии, изучаемые всеми химическими элементами, входящими в состав электродов. В составе электрода различают основной элемент и примеси (например, в электроде из стали - основным элементом является железо, а все остальные примеси).

Отсутствие линий какого-либо элемента свидетельствуют о том, что в анализируемом объекте этого элемента нет или его содержание так мало, что прибор не может его выявить. Яркость (интенсивность) спектральных линий того или иного элемента, содержащегося в образце тем больше, чем больше концентрация этого элемента. Зависимость между интенсивностью линий каждого элемента и концентрацией его в образце лежит в основе всех методов количественного спектрального анализа.

Интенсивность линий зависит также от других факторов: условий разряда, условий возбуждения и др.

Для того, чтобы исключить или хотя бы свести до минимума влияние других факторов, концентрация анализируемого элемента определяется не по абсолютной интенсивности его линий, а путем сравнения с одной из линий основного элемента. Причем, линия определяемого элемента и линия основного элемента выбирается так, чтобы их сравнительная яркость не зависела от условий разряда. Наиболее точную оценку можно сделать при равенстве интенсивностей сравнительных линий. Меньшую, но все же достаточную точность получаем, когда линии определяемого элемента имеют большую или меньшую яркость, чем линия сравнения.

Для количественного спектрального анализа разработаны специальные таблицы и фотографии спектров с указаниями к ним.

В них выделены пары линий, по которым определяется концентрация. Различные пары линий позволяют определить различную концентрацию исследуемого элемента. В соответствии с этим выбранные линии делятся на группы, например  $C_{z_1}$ ,

$C_{z_2}$ ,  $C_{z_3}$ ,  $C_{z_4}$  и т.д., где индекс  $z$  указывает, что с помощью этой линии можно определить минимальное содержание данного элемента, а линии с большим индексом служат для определения больших концентраций.

Рассмотрим пример по определению хрома в стали.

К инструкции приложены фотографии четырех групп линий  $C_z$  и, рядом лежащих, линий железа (рис. 5, 6, 7, 8). Условно линии пронумерованы и рядом указаны их длины волн.

Например ( см. рис.5)

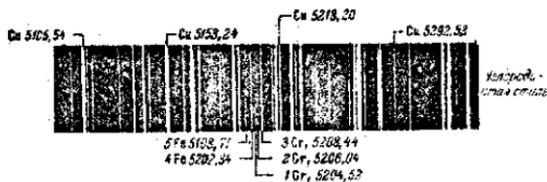
- 1  $Cr_2$  5204, 52  $A^\circ$  ,
- 2  $Cr_2$  5206,04  $A^\circ$  .

Чтобы в поле зрения была видна требуемая группа линий, ставим указатель маховичка стилоскопа 27 ( рис. 4) на то деление, которое указано под рисунком группы.

Сравнивая расположение линий в поле зрения с расположением их на снимке, отсоединяем линии  $Cr$  .

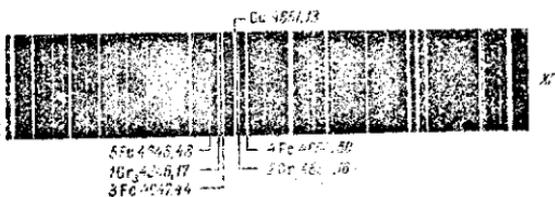
Так как неизвестно, сколько  $Cr$  содержится в образце, анализ начинаем с группы 1 , т.е. с минимальной концентрации. Под снимком группы даны так называемые "аналитические признаки".

Например , если яркость линий хрома 1' 5204,52 равна яркости линии железа, отмеченной 5Fe , то хрома содержится 0,05%. На фотографии это отмечено записью 0,05% - 1 $Cr_2$  = 5. Если яркость линии 1 $Cr_2$  больше чем яркость линии 5Fe , значит  $Cr$  содержится больше 0,05%. В этом случае проверяем концентрацию 0,1%. При таком содержании хрома - линия 1 $Cr_2$  несколько менее яркая, чем линия 4Fe , что на рис.5 отмечено неравенством 0,1%-1 $Cr_2$  < 4. Если линия 1 $Cr_2$  ярче линии 4Fe , рассматриваем следующую концентрацию 0,2%. В этом случае 0,2% - 1 $Cr_2$  > 4 , т.е. линия  $Cr$  чуть ярче или равна по яркости линии 4Fe . При более высокой концентрации перейдем к следующей группе линий до тех пор, пока не определим содержание хрома. Таким же образом по соответствующим фотографиям и указаниям определяем содержание других эле-



Группа Cr<sub>1</sub> (медный электрод):  
 0,00% — 1Cr<sub>1</sub> = 1;    0,10% — 1Cr<sub>1</sub> < 1;    0,20% — 1Cr<sub>1</sub> > 4.

Рис. 5



Группа Cr<sub>2</sub> (медный электрод):  
 0,1% — 1Cr<sub>2</sub> < 3;    1Cr<sub>2</sub> < 5;    0,2% — 1Cr<sub>2</sub> = 3;  
 0,2% — 1Cr<sub>2</sub> < 3;    1Cr<sub>2</sub> > 5;    0,3% — 1Cr<sub>2</sub> > 3.

Рис. 6



Группа Cr<sub>3</sub> (медный электрод):  
 1,0% — 1Cr<sub>3</sub> = 2;    2,5% — 1Cr<sub>3</sub> = 3;    5,0% — 1Cr<sub>3</sub> > 4.

Рис. 7



Группа Cr<sub>4</sub> (медный электрод):  
 0,5% — 1Cr<sub>4</sub> = 1;    1,5% — 1Cr<sub>4</sub> > 5;    1Cr<sub>4</sub> = 5;    10% — 1Cr<sub>4</sub> = 4;  
 0,1% — 2Cr<sub>4</sub> = 1;    2,1% — 2Cr<sub>4</sub> = 6;    20% — 1Cr<sub>4</sub> > 4;    20Cr < 4;  
 1,0% — 1Cr<sub>4</sub> = 6;    5,0% — 3Cr<sub>4</sub> = 3;    30% — 1Cr<sub>4</sub> > 4;    30Cr > 4.

Рис. 8

источков.

### § 3. Порядок выполнения работы

1. Зачистить электроды и установить их на расстоянии 3 мм с помощью шаблона.

2. Включить дугу. Поворотом маховичка 36 (рис. 4, 5) добиться наибольшей освещенности поля зрения.

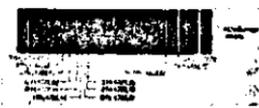
3. Определить содержание *Сг* в анализируемом образце в соответствии с методикой, описанной выше (рис. 5, 6, 7, 8).

4. Определить содержание *Mn* в том же образце, пользуясь рис. 9, 10, 11, 12.

### В н и м а н и е

Посторожливое к электродам во время работы, строго воспрещается во избежание поражения током.

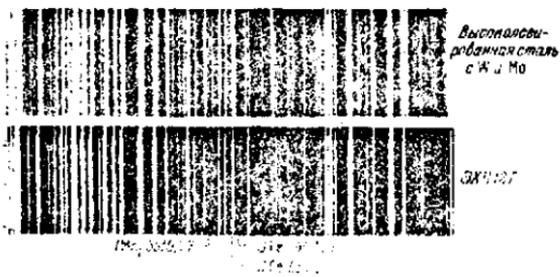
Менять электроды и прикасаться к электрододержателям можно только при отключенном генераторе от источника тока. Во время работы не следует смотреть на дугу, так как свет ее содержит ультрафиолетовые лучи, вредные для глаз.



Группа М<sub>2</sub> (медный электрод):

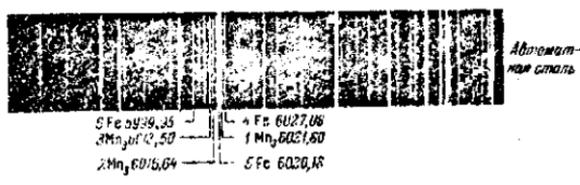
0,2% — 2Mn <sub>2</sub> < 2	0,4% — 2Mn <sub>2</sub> < 6
0,25% — 2Mn <sub>2</sub> < 6	0,5% — 2Mn <sub>2</sub> < 6
0,3% — 2Mn <sub>2</sub> < 6	0,6% — 2Mn <sub>2</sub> < 6
0,35% — 2Mn <sub>2</sub> < 6	0,7% — 2Mn <sub>2</sub> < 6

Рис. 9



Группа М<sub>2</sub> (медный электрод):  
 2% — 1Mn<sub>2</sub> < 2, 3% — 1Mn<sub>2</sub> < 2, 4% — 1Mn<sub>2</sub> < 2

Рис. 10



S Fe 6029,35  
 2Mn<sub>2</sub> 6021,50  
 2Mn<sub>2</sub> 6016,64

4 Fe 6027,08  
 1Mn<sub>2</sub> 6021,60  
 5 Fe 6020,18

Группа М<sub>2</sub> (медный электрод):  
 0,2% — 2Mn<sub>2</sub> < 6, 0,4% — 2Mn<sub>2</sub> < 6, 2Mn<sub>2</sub> < 1  
 0,25% — 2Mn<sub>2</sub> < 6, 0,3% — 2Mn<sub>2</sub> < 6  
 0,3% — 2Mn<sub>2</sub> < 6, 2Mn<sub>2</sub> < 6, 1,0% — 1Mn<sub>2</sub> < 6  
 0,35% — 2Mn<sub>2</sub> < 6

Рис. 11



1Mn<sub>2</sub> 4451,81 2 Fe 4454,33

Группа М<sub>2</sub> (медный электрод):  
 0,6% — 1Mn<sub>2</sub> < 2, 0,9% — 1Mn<sub>2</sub> < 2  
 0,7% — 1Mn<sub>2</sub> < 2, 1,0% — 1Mn<sub>2</sub> < 2

Рис. 12

§ 4. Контрольные вопросы.

1. Как объяснить с точки зрения строения атома возникновение линейчатого спектра?

2. Начертить схему энергетических уровней.

3. В чем сущность качественного и количественного спектрального анализа?

4. Начертить принципиальную схему спектрального аппарата.

5. В чем сущность метода определения концентрации примеси в стали с помощью спектрометра?

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

I. Основные физические постоянные

Физическая постоянная	Символ- знак	Числовое значение
Нормальное ускорение свободно падающих тел	$g_0$	9,81 м/сек <sup>2</sup>
Гравитационная постоянная	$\gamma$	$6,67 \cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> /кг · сек <sup>2</sup>
Число Авогадро	$N$	$6,02 \cdot 10^{26}$ кмоль <sup>-1</sup>
Универсальная газовая постоянная	$R$	$8,32 \cdot 10^3$ дж/град · кмоль
Постоянная Больцмана	$K$	$1,38 \cdot 10^{-23}$ дж/град
Стандартный объем идеального газа (объем одного киломоля идеального газа при нормальных условиях)	$V_0$	22,4 м <sup>3</sup> /кмоль
Элементарный электрический заряд	$e$	$1,60 \cdot 10^{-19}$ к
Число Фарадея	$F$	$9,65 \cdot 10^7$ к/кг · экв
Скорость света в вакууме	$c$	$3 \cdot 10^8$ м/сек
Постоянная закона Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ вт/м <sup>2</sup> · град <sup>4</sup>
Постоянная закона смещения Вина	$c'$	$2,89 \cdot 10^{-3}$ м · град
Постоянная в формуле второго закона Вина	$c''$	$1,30 \cdot 10^{-5}$ вт/м <sup>3</sup> · град <sup>5</sup>
Постоянная Планка	$h$	$6,62 \cdot 10^{-34}$ дж · сек
Постоянная Ридберга (для атома водорода $H^1$ )	$R$	$1,097 \cdot 10^7$ м <sup>-1</sup>
Радиус первой боровской орбиты	$r_1$	$0,529 \cdot 10^{-10}$ м
Комптонская длина волны электрона	$\lambda$	$2,43 \cdot 10^{-12}$ м
Магнетон Бора	$\mu_0$	$0,927 \cdot 10^{-23}$ дж/тл
Потенциал ионизации атома водорода (энергия ионизации)	$I_0$	$2,18 \cdot 10^{-18}$ дж (13,6 эв)
Атомная единица массы	<i>а.е.м.</i>	$1,660 \cdot 10^{-27}$ кг
Коэффициент пропорциональности между энергией в Мэв и массой в а. е. м.	$K$	931 Мэв/а.е.м.

2. Показатели преломления твердых и жидких тел

№ п/п	Наименование материала	Химическая формула	°С	$n_D$ ( $\lambda = 5893 \text{ \AA}$ )
1.	Алмаз	C	20	2,419
2.	Ацетон	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	20	1,359
3.	$\alpha$ - монохлорнафталин	C <sub>10</sub> H <sub>7</sub> Cl	20	1,645
4.	$\alpha$ - монобромнафталин	C <sub>10</sub> H <sub>7</sub> Br	20	1,658
5.	Бакелит	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub> II	20	1,570
6.	Бальзам канадский	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub>	20	1,530
7.	Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	20	1,501
8.	Бромоформ	CHBr <sub>3</sub>	20	1,590
9.	Вискомлит		20	1,640-1,680
10.	Вода	H <sub>2</sub> O	20	1,333
11.	Воздух	N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> и т.д.	20	1,00029
12.	Глицерин	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	20	1,485
13.	Исландский шпат (об. луч.)	CaCO <sub>3</sub>	20	1,658
14.	Исландский шпат (необ. луч.)	CaCO <sub>3</sub>	20	1,553
15.	Кодистый метилен	CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub>	19	1,742
16.	Кварц (об. луч.)	SiO <sub>2</sub>	20	1,543
17.	Кварц (необ. луч.)	SiO <sub>2</sub>	20	1,552
18.	Каучук (искусств.)	(C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>n</sub>	20	1,500
19.	Каменная соль	NaCl	20	1,544
20.	Кедровое масло	-	20	1,500
21.	Ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	16	1,500
22.	Лед (об. луч.)	H <sub>2</sub> O	0	1,309
23.	Лед (необ. луч.)	H <sub>2</sub> O	0	1,310
24.	Монобромбензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Br	20	1,562
25.	Нитробензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	20	1,553
26.	Плексиглас	(C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> R) <sub>n</sub>	20	1,488
27.	Полистирол	(C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ) <sub>n</sub>	20	1,590
28.	Стекло Кронглас	Na <sub>2</sub> O; K <sub>2</sub> O; 6SiO <sub>2</sub>	20	1,510
29.	Стекло тяжелый флинт		20	1,750
30.	Стекло тяжелый флинтглас		20	1,963
31.	Серебро хлористое	AgCl	20	2,218
32.	Серебро бромистое	AgBr	20	2,388
33.	Сероуглерод	CS <sub>2</sub>	20	1,631

№	1	2	3	4	5
34.	Спирт этиловый		$C_2H_5OH$	18	1,362
35.	Спирт метиловый		$CH_3OH$	18	1,330
36.	Слюда (Na)		$KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$	20	1,560
37.	Слюда (Ne)		- "	20	1,594
38.	Слюда (Nc)		- "	20	1,598
39.	Толуол		$C_6H_5CH_3$	20	1,497
40.	Целлулоид		$C_6H_7N_3O_{11}$	20	1,470
41.	Эпоксидные смолы			20	1,550-1,650

3. Зависимость показателя преломления от длины волны для некоторых веществ

Длина волны $\lambda$ в $\text{Å}$	Цвет спектральной линии	Стекло, легкий хрон	Стекло, тяжелый флинт	Сероуглерод	Вода
6563	красный	1,5145	1,6444	1,6219	1,3311
5893	желтый	1,5170	1,6499	1,6308	1,3330
4862	голубой	1,5230	1,6657	1,6799	1,3371
4047	фиолетовый	1,5318	1,6852	1,6990	1,3428

4. Интервалы длин волн для основных цветов  
видимого спектра

№ п/п	Цвет спектра	Интервал длин волн в мк
1	Красный	0,76-0,63
2	Оранжевый	0,63-0,60
3	Желтый	0,60-0,57
4	Зеленый	0,57-0,50
5	Голубые	0,50-0,45
6	Синие	0,45-0,43
7	Фиолетовые	0,43-0,38

5. Постоянная вращения для некоторых материалов

№ п/п	Материалы	Постоянная вращения в градусах для $\lambda = 5893 \text{ \AA}$	Правовращающие (усл. обозн.)	Левовращающие (усл. обозн.)
1	Тростниковый сахар (сахароза)	66,473	+	
2	Глюкоза (декстроза)	52,500	+	
3	Инвертный сахар	19,447		-
4	Виннокаменная кислота	14,830	+	-
5	Скипидар	37,000		-
6	Каффор	40,900	+	
7	Кварц	21,724	+	-

6. Зависимость постоянной вращения кварца от  
длины волны

$\lambda$ в $\text{\AA}$	6563	5893	4861	4330	4047	2147
$[\alpha]$ в °	17,320	21,724	32,761	41,924	89,90	236

7. Работа выхода электронов для некоторых элементов таблиц Д. И. Менделеева

Элемент	Символ	Порядковый номер	Работа выхода (эВ)	Элемент	Символ	Порядковый номер	Работа выхода (эВ)
Литий	Li	3	2,49				
Бериллий	Be	4	3,92				
Бор	B	5	4,5	Серебро	Ag	47	4,79
Углерод	C	6	4,4	Кадмий	Cd	48	4,10
Натрий	Na	11	2,28	Олово	Sn	50	4,09
Магний	Mg	12	3,79	Сурьма	Sb	51	4,14
Алюминий	Al	13	4,20	Теллур	Te	52	4,76
Кремний	Si	14	4,2	Цезий	Cs	55	1,94
Калий	K	19	2,26	Барий	Ba	56	2,48
Кальций	Ca	20	3,21	Лантан	La	57	3,3
Титан	Ti	22	4,17	Церий	Ce	58	2,84
Ванадий	V	23	4,44	Празеодимий	Pr	59	2,7
Хром	Cr	24	4,60	Неодимий	Nd	60	3,3
Марганец	Mn	25	4,14	Самарий	Sm	62	3,2
Железо	Fe	26	4,48	Гафний	Hf	72	3,53
Кобальт	Co	27	4,4	Тантал	Ta	73	4,19
Никель	Ni	28	5,24	Вольфрам	W	74	4,54
Медь	Cu	29	4,55	Рений	Re	75	5,1
Цинк	Zn	30	4,28	Осмий	Os	76	4,55
Галлий	Ga	31	3,80	Иридий	Ir	77	4,57
Германий	Ge	32	4,5	Платина	Pt	78	5,36
Мышьяк	As	33	5,1	Золото	Au	79	4,46
Селен	Se	34	4,4	Ртуть	Hg	80	4,50
Рубидий	Rb	37	2,16	Таллий	Tl	81	3,84
Стронций	Sr	38	2,74	Свинец	Pb	82	3,94
Цирконий	Zr	40	3,91	Висмут	Bi	83	4,25
Ниобий	Nb	41	4,01	Торий	Th	90	3,47
Молибден	Mo	42	4,20	Уран	U	92	3,4
Рутений	Ru	44	4,52				1,60
Родий	Rh	45	4,80				2,63
Палладий	Pd	46	4,97				1,40

8. Потенциалы ионизации атомов

$\lambda$	Атом	Первый (в)	Второй (в)	Третий (в)	Z	Элемент	Первый (в)	Второй (в)	Третий (в)
1	H	13,595			11	Na	5,138	47,29	71,65
2	H <sub>2</sub>	24,581	54,403		18	Ar	15,755	27,62	40,90
3	Li	5,390	75,619	122,419	19	K	4,339	31,81	46,00
4	Be	9,320	18,206	153,850	36	Kr	13,996	24,56	36,90
5	B	8,296	25,149	37,920	37	Rb	4,176	27,50	40,00
6	C	11,256	24,376	47,871	54	Xe	12,127	21,20	32,10
7	N	14,53	29,593	47,426	55	Cs	3,893	25,10	-
8	O	13,614	35,108	54,885	80	Hg	10,43	18,751	34,2
9	F	17,418	34,980	62,646	86	Rn	10,746	-	-
10	Ne	21,559	41,070	63,5	92	U	6,08	-	-

9. Потенциалы ионизации двухатомных и трехатомных молекул

Молекула	Ионизационный потенциал (в)	Молекула	Ионизационный потенциал (в)
H <sub>2</sub>	15,42	NO	9,25
N <sub>2</sub>	15,58	CO	14,01
O <sub>2</sub>	12,2	H <sub>2</sub> O	12,6
Cl <sub>2</sub>	11,3	CO <sub>2</sub>	13,8
Br <sub>2</sub>	10,9	SO <sub>2</sub>	12,0
I <sub>2</sub>	9,04	NO <sub>2</sub>	12,3
NO <sub>2</sub>	12,6	NH <sub>3</sub>	10,5

10. Длина волн основных спектральных линий некоторых элементов в видимой части спектра.

Элемент	Длина волны, А							
H	3835	O	5045	Ca	3969	Br	4607	
	3889		5179		4227		5972	
	3970		5328		4455		6142	
	4102		5942		4878		6496	
	4340		6008		5270	Sr	4607	
	4862		6483		5349		6386	
	6563		6278		5590		6408	
	He		3889		Na	6870	Fe	5857
4026		7185	6122	4934				
4471		7621	6162	5535				
4713		5890	6439	5972				
4922		5896	4308	6142				
5016		Mg	5167	4326		6496		
5876			5173	4384		Hg		2537
6578			5184	4668				3650
7065	4045		9558	3655				
Li	4603	K	6911	5167	4047			
	6104		6939	5169	4358			
	6708		7665	5270	5235			
N	4151	Ca	7665	Cu	4023	5461		
	4215		7699		4063	5770		
	4242		3934		4275	5791		
	4358		4378		4378	6128		
	4447		4587		4587	6908		
	4630		5153		5153	7082		
	4788		5218		5218			
	4935		5700		5700			
4994	5782	5782						

II. Таблица синусов и тангенсов

Градусы	Sin	tg	Градусы	Sin	tg	Градусы	Sin	tg
0	0,0000	0,0000	30	0,5000	0,5774	60	0,8660	1,7321
1	0,0175	0,0175	31	0,5150	0,6009	61	0,8746	1,8040
2	0,0349	0,0349	32	0,5299	0,6249	62	0,8829	1,8807
3	0,0523	0,0524	33	0,5446	0,6494	63	0,8910	1,9626
4	0,0698	0,0699	34	0,5592	0,6745	64	0,8988	2,0503
5	0,0872	0,0875	35	0,5736	0,7002	65	0,9063	2,1445
6	0,1045	0,1051	36	0,5878	0,7265	66	0,9135	2,2460
7	0,1219	0,1228	37	0,6018	0,7536	67	0,9205	2,3559
8	0,1392	0,1405	38	0,6157	0,7813	68	0,9272	2,4751
9	0,1564	0,1584	39	0,6293	0,8098	69	0,9336	2,6051
10	0,1736	0,1763	40	0,6428	0,8391	70	0,9397	2,7475
11	0,1908	0,1944	41	0,6561	0,8693	71	0,9455	2,9042
12	0,2079	0,2126	42	0,6691	0,9004	72	0,9511	3,0777
13	0,2250	0,2309	43	0,6820	0,9325	73	0,9563	3,2709
14	0,2419	0,2493	44	0,6947	0,9657	74	0,9613	3,4874
15	0,2588	0,2679	45	0,7071	1,0000	75	0,9659	3,7321
16	0,2756	0,2868	46	0,7193	1,0355	76	0,9703	4,0108
17	0,2924	0,3057	47	0,7314	1,0724	77	0,9744	4,3315
18	0,3090	0,3249	48	0,7431	1,1106	78	0,9781	4,7046
19	0,3256	0,3443	49	0,7547	1,1504	79	0,9816	5,1446
20	0,3420	0,3640	50	0,7660	1,1918	80	0,9848	5,6710
21	0,3584	0,3839	51	0,7771	1,2349	81	0,9877	6,3138
22	0,3746	0,4040	52	0,7880	1,2799	82	0,9903	7,1154
23	0,3907	0,4245	53	0,7986	1,3270	83	0,9925	8,1440
24	0,4067	0,4452	54	0,8090	1,3764	84	0,9945	9,5144
25	0,4226	0,4663	55	0,8192	1,4281	85	0,9962	11,4301
26	0,4384	0,4877	56	0,8290	1,4826	86	0,9976	14,3006
27	0,4540	0,5095	57	0,8387	1,5399	87	0,9986	19,0811
28	0,4695	0,5317	58	0,8480	1,6003	88	0,9994	26,6363
29	0,4848	0,5543	59	0,8572	1,6643	89	0,9998	57,29
30	0,5000	0,5774	60	0,8660	1,7321	90	1,0000	

Подписано к печати 4. IX. 1968 г. Формат 60 x 84  $\frac{1}{16}$ . Печ. в. 6,20.  
Уч.-изд. л. 6,810. Заказ 186. Тираж 1000 экземпляров. Отпечатано на  
ротаврийте БИМСХ.

Цена 18 коп.

0