

*Работа № 12*

Вращение плоскости поляризации

Методические рекомендации

## Цель работы

1. Изучение вопросов поляризации света и вращения плоскости поляризации различными веществами.
2. Освоение метода поляриметрии.
3. Знакомство с веществами, обладающими способностью вращения плоскости поляризации световых волн.

## Основные приборы и принадлежности

Поляриметр, прямоугольные кюветы для растворов сахара различной концентрации, рефрактометр, набор растворов сахара разной концентрации

### 1. Поляризация света

По современным представлениям свет — это сложный электромагнитный процесс, изменяющийся во времени и в пространстве, и обладающий одновременно волновыми и квантовыми свойствами. В таких явлениях, как дифракция, интерференция, дисперсия, поляризация, проявляются волновые свойства света. При поглощении и излучении света атомами или молекулами вещества проявляются его квантовые свойства. Это наблюдается, например, при фотоэффекте, люминесценции, вынужденном (лазерном) или тепловом излучении.

В соответствии с максвелловской теорией электромагнитного поля электромагнитная волна представляет собой периодическое изменение электрического и магнитного полей в пространстве и во времени, распространяющееся во все стороны из той области, где происходят электромагнитные колебания. Распространяясь в пространстве, волна несет поток электромагнитной энергии, тем больший, чем больше величины напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}$ , характеризующие поле. Бегущая плоская поперечная электромагнитная волна может быть представлена совокупностью изменяющихся и создающих друг друга электрического и магнитного полей. Векторы напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}$  в любой момент времени взаимно перпендикулярны в каждой точке волны и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору скорости распространения волны  $\vec{V}$ . Вектора  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{V}$  образуют правовинтовую систему (рис. 1).

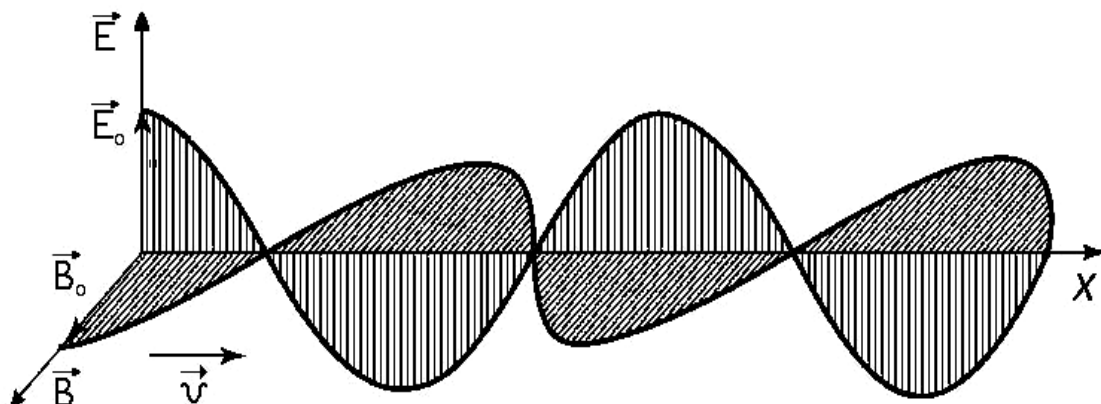


Рис. 1. Бегущая плоская электромагнитная волна

Колебания  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  происходят в одинаковой фазе и описываются уравнениями:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0) \\ \vec{B} &= \vec{B}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\vec{E}_0$  и  $\vec{B}_0$  — амплитуды напряженности электрического и индукции магнитного полей,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu \quad \text{— круговая частота,}$$

$$\nu = \frac{1}{T} \quad \text{— частота и период,}$$

$$k = \frac{\omega}{V} = \frac{2\pi}{TV} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{— волновое число,}$$

$\lambda$  — длина волны,

$\varphi_0$  — начальная фаза в точке с координатой  $x = 0$ .

Эксперимент и теория показывают, что физическое, химическое, физиологическое и другие виды взаимодействия света с веществом обусловлены, главным образом, изменением вектора  $\vec{E}$  электромагнитной волны, колебания вектора  $\vec{B}$  можно при этом не учитывать. Поэтому световой луч можно описывать изменением вектора  $\vec{E}$ , помня о существовании перпендикулярного ему вектора  $\vec{B}$ . Электромагнитная волна, изображенная на рис. 1, поляризована, так как колебания вектора  $\vec{E}$  происходят в одной плоскости — плоскости чертежа.

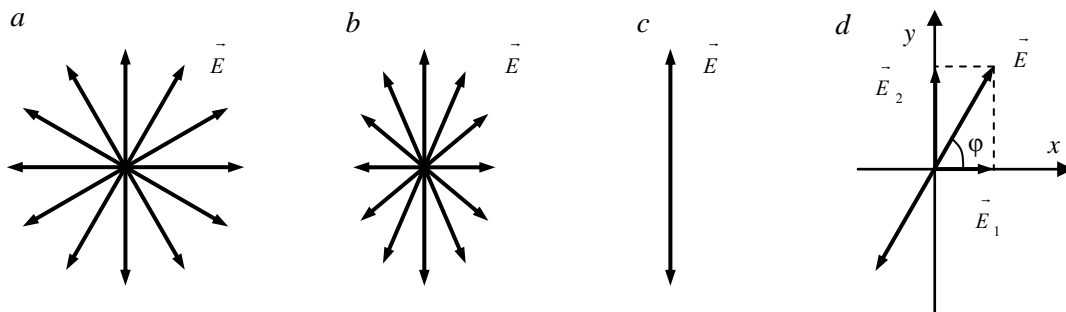


Рис. 2. Проекционная картина естественного (а), частично (b) и линейно (с, d) поляризованного света,  $\varphi$  — азимут поляризации

Естественные и искусственные макроскопические источники света, такие, как лампы накаливания, газоразрядные лампы. Солнце и т.д., представляют собой совокупность множества атомных излучателей, которые испускают кванты света независимо друг от друга. Пространственная ориентация векторов  $\vec{E}$  и моменты актов испускания отдельными частицами распределены хаотически. Поэтому световая волна, излучаемая источником, характеризуется быстро изменяющимися колебаниями векторов  $\vec{E}$ , плоскости которых ориентированы с равной вероятностью во всевозможных направлениях, перпендикулярных направлению распространения светового луча. Такой свет называется *естественным (неполяризованным)* и может быть изображен совокупностью векторов  $\vec{E}$ , расположенных хаотично в сечении, перпендикулярном распространению луча (рис. 2а). Свет, в котором колебания вектора  $\vec{E}$  каким-либо образом упорядочены, называется *поляризованным*. Так, если в результате некоторых воздействий появляется

преимущественное (но не исключительное) направление колебаний вектора, то свет становится частично поляризованным (рис. 2b). Если вектор  $\vec{E}$  (а, следовательно, и  $\vec{B}$ ) колеблется в определенной плоскости, то свет называется *линейно поляризованным*. Проекция такого вектора на плоскость, перпендикулярную направлению распространения светового луча, может быть произвольной и определяется углом  $\varphi$ , который называется *азимутом поляризации* (рис. 2d).

Свет, излучаемый каким-либо отдельно взятым элементарным излучателем (атомом, молекулой), в каждом акте излучения всегда поляризован. Особенности элементарного акта излучения света, а также множество физических процессов, нарушающих осевую симметрию естественного света, приводят к тому, что свет всегда частично поляризован. Поляризация света может происходить при отражении и преломлении на границе раздела двух сред, а также при прохождении через неоднородную (анизотропную) среду либо вследствие двойного лучепреломления, либо из-за различия коэффициентов поглощения световых колебаний в разных кристаллографических направлениях.

Линейно поляризованный свет можно получить из естественного с помощью приборов, называемых *поляризаторами*. Поляризаторы представляют собой пластинку, вырезанную из анизотропных кристаллов так, чтобы оптическая ось кристалла совпадала с плоскостью пластинки. *Оптическая ось* — это такое направление в кристалле, проходя вдоль которого свет не поляризуется. При прохождении света поляризатор полностью пропускает колебания, параллельные оптической оси кристалла, и полностью или частично задерживает колебания, перпендикулярные этой оси.

### 1.1. Пространственно-геометрические представления поляризованного света

Рассмотрим пространственно-геометрические представления о возможности получения линейной, круговой и эллиптической поляризации света. Вид поляризации зависит от разности фаз взаимодействующих электромагнитных волн. Так, линейно поляризованный свет может быть получен при сложении двух взаимно перпендикулярных волн с векторами  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ . Если амплитуды этих волн равны ( $E_1 = E_2$ ) и колебания совпадают по фазе, результирующая волна будет линейно поляризована с азимутом  $\varphi = +45^\circ$  (рис. 3). Если разность фаз окажется равной  $\pi$ , то азимут результирующей волны будет равен  $\varphi = -45^\circ$ .

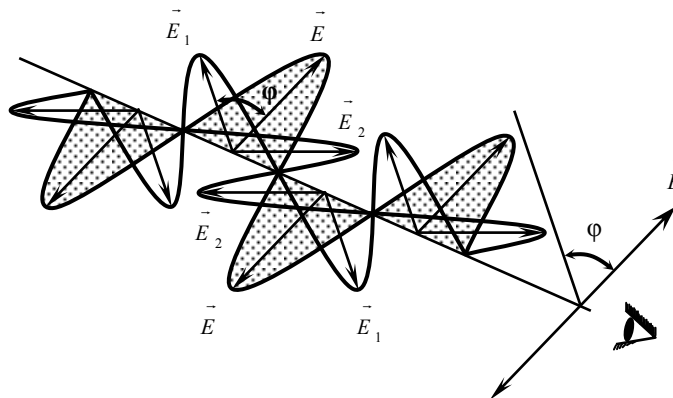


Рис. 3. Сложение взаимно перпендикулярных поляризованных волн, совпадающих по фазе. Результирующая волна заштрихована.

Если амплитуды двух волн равны ( $\vec{E}_1 = \vec{E}_2$ ), но разность фаз окажется равной  $\pi/2$  (разность хода  $\Delta = \lambda/2$ ), то при отставании первой волны по фазе вектор напряженности  $\vec{E}$  результирующей волны будет описывать правовинтовую линию по поверхности кругового цилиндра, а при опережении — левовинтовую.

В более сложном случае, когда ( $\vec{E}_1 \neq \vec{E}_2$ ) проекционная картина представляет собой эллипс правого или левого вращения.

Итак, очевидно, что возникновение линейной или круговой поляризации определяется разностью фаз двух волн. Если же разность фаз окажется переменной величиной, то возникает неполяризованная волна — естественный свет. *Линейная, круговая и эллиптическая* поляризация — три основных типа поляризации света. При этом эллиптическая поляризация включает два других типа, как более простые случаи. Если при наблюдении навстречу лучу движение вектора  $\vec{E}$  происходит по часовой стрелке, то поляризация называется *правой*, в противном случае — *левой*.

Необходимо отметить, что приведенные рассуждения о получении поляризованного света при сложении двух волн имеют очень важный обратный результат, суть которого состоит в следующем.

Всякая линейно поляризованная волна с вектором напряженности  $\vec{E}$ , изменяющимся по гармоническому закону, может быть разложена на две компоненты с правой ( $\vec{E}_1$ ) и левой ( $\vec{E}_2$ ) круговой поляризацией. Из-за сложности пространственного изображения на чертеже компонент с правым и левым винтовым вращением ограничимся проекционной картиной. На рис. 4 векторами со штрихами ( $\vec{E}', \vec{E}_1', \vec{E}_2', \vec{E}'', \vec{E}_1'', \vec{E}_2''$  и т.д.) обозначено положение векторов  $\vec{E}, \vec{E}_1, \vec{E}_2$  в различные моменты времени. За время равное половине периода  $T/2$  вектора  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ , описывают половину окружности, перемещаясь, первый — по часовой стрелке, а второй — против нее.

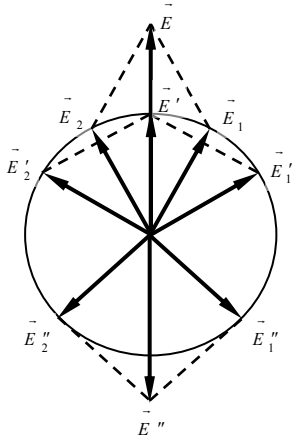


Рис. 4. Проекционная картина разложения линейно поляризованной электромагнитной волны с вектором напряжённости  $\vec{E}$  на две компоненты с правой ( $\vec{E}_1$ ) и левой ( $\vec{E}_2$ ) круговой поляризацией

Описанное разложение линейно поляризованного света на две составляющих с правой и левой круговой поляризацией является чрезвычайно важным для понимания сути явления вращения плоскости поляризации света.

## 1.2. Вращение плоскости поляризации

Вращение плоскости поляризации было открыто Араго в 1811 г. при изучении оптических свойств кварца. Хотя в настоящее время известны вещества, вращающая способность которых в несколько раз больше, чем у кварца (например, киноварь), тем не менее кварц до настоящего времени остается классическим

объектом для демонстрации данного явления и, более того, используется во многих приборах. Заметим, что плавленый (аморфный) кварц вращательной способностью не обладает.

Кварц является одноосным кристаллом, так что при пропускании света вдоль оптической оси он должен был бы вести себя как изотропное тело. Однако это не так. При прохождении линейно поляризованного света через кварц его плоскость поляризации поворачивается на некоторый угол  $\theta$ . Эксперимент показывает, что этот угол поворота  $\theta$  зависит от длины волны  $\lambda$  поляризованного света и от толщины кристалла  $l$ :

$$\theta = a l \quad (2)$$

Коэффициент  $a$  характеризует оптическую активность кварца (вращательную способность), которая зависит от длины волны. Так пластинка кварца толщиной 1 мм вращает плоскость поляризации красного света на  $15^\circ$ , зеленого — на  $27^\circ$ , фиолетового — на  $51^\circ$ . Для желтой линии паров натрия

$$\lambda = 589 \text{ нм}, a = 21,7 \text{ град/мм.} \quad (3)$$

При наблюдении вращения плоскости поляризации в кварце обнаружено, что в природе существует два вида кристаллов кварца: правовращающие (или положительные (+)) и левовращающиеся (или отрицательные (-)). Величина вращательной способности в обоих случаях одинакова  $a_+ = a_-$ , т.е. если поляризованный свет, прошедший через кристалл, отразится от зеркала и вторично пройдет через тот же кристалл, то направление плоскости поляризации восстановится.

Применение чувствительных методов исследования показало, что явление вращения плоскости поляризации весьма распространено и проявляется в большей или меньшей степени очень многими и некристаллическими веществами. К их числу принадлежат чистые жидкости (например, скипидар) и растворы многих веществ в неактивных растворителях (например, водные растворы сахара). В настоящее время известны тысячи активных веществ, обладающих весьма различной вращательной способностью от едва заметной до очень большой. Так, например, никотин в слое толщиной 10 см поворачивает плоскость поляризации желтых лучей на  $164^\circ$ .

В 1831 г. Ж.Б. Био экспериментально установил для растворов, что угол поворота плоскости поляризации  $\theta$  прямо пропорционален толщине слоя раствора и концентрации  $C$  активного вещества:

$$\theta = [\alpha] l C \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности  $[\alpha]$ , аналогично коэффициенту  $a$  для кристаллов, характеризует природу вещества и называется *удельным вращением*. Величина удельного вращения  $[\alpha]$  зависит от длины волны падающего света и окружающей температуры, и может меняться при изменении растворителя.

Закон Био (4) показывает, что для растворенных веществ способность вращения плоскости поляризации обусловлена свойствами молекул вещества. Величина угла поворота возрастает пропорционально числу молекул на пути луча света, т.е. пропорционально толщине слоя и концентрации вещества. В соответствии с этим наблюдается вращение и в аморфных веществах, состоящих из тех же молекул (например, сахарные леденцы), и в парах скипидара или камфоры. Таким образом, в отличие от кристаллических веществ вращательная способность таких веществ не зависит от агрегатного состояния.

### 1.3. Теория вращения плоскости поляризации

В основе теории вращения плоскости поляризации лежит гипотеза, согласно которой скорость распространения света в активных веществах различна для лучей, поляризованных по правому и левому кругу. Это означает, что линейно поляризованный луч с вектором  $\vec{E}$  в веществе разлагается на две компоненты с правой (+) и левой (–) круговой поляризацией, которые проходят по кристаллу с разной скоростью. Так, например, для правовращающего кварца:

$$V_+ > V_-, \quad n_+ < n_- \quad (5)$$

где  $V$  — скорость света, поляризованного по кругу,  $n$  — соответствующие показатели преломления, которые связывают скорости света в веществе и в вакууме  $n = \frac{c}{V}$ . Так как левая волна распространяется с меньшей скоростью, то на выходе из кристалла она окажется отстающей по фазе относительно правой волны. Результирующий вектор напряженности окажется повернутым на некоторый угол  $\theta$ , который будет зависеть от структуры вещества, длины пути света в веществе  $l$  и длины волны падающего света  $\lambda_0$ , но не будет зависеть от интенсивности света:

$$\theta = \frac{\pi l}{\lambda_0} (n_- - n_+). \quad (6)$$

Вывод формулы (6) приведен в приложении.

## 2. Оптически активные вещества

Оптически активные вещества подразделяются на два вида. К первому относятся вещества оптически активные в любом агрегатном состоянии, как молекулярном (растворы), так и кристаллическом. К ним относятся сахар, камфора, винная кислота. Ко второму типу относятся вещества, которые оптически активны только в кристаллическом состоянии (кварц, киноварь).

Вращать плоскость поляризации способны только асимметричные среды. *Асимметрией* среды называется способность вещества (молекул, кристаллов) существовать в двух формах, правой и левой — зеркальными отражениями друг друга (подобно правой и левой рукам). Винтообразность, спиральность структуры внутренне присуща асимметричным веществам. Асимметричные молекулы не имеют плоскости и центра симметрии.

подавляющая часть асимметричных молекул органических веществ содержит асимметричный элемент структуры — атом углерода, связанный четырьмя валентными связями с различными атомами (рис. 5а). Пространственная структура этой группы является тетраэдроподобной. Т.е. можно считать как бы элементарной ячейкой винтовой структуры. Простейшая молекула метана  $\text{CH}_4$

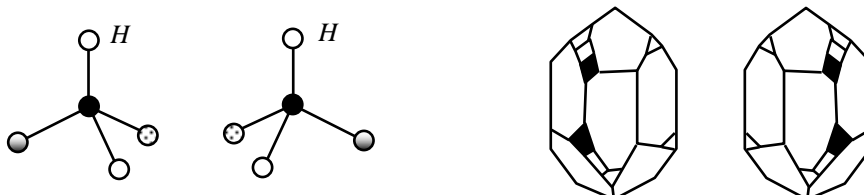


Рис. 5. Зеркальные изомеры: а) асимметричная молекула, б) энантиоморфные кристаллы кварца

является тетраэдром, в центре которого расположен атом углерода, а в вершинах — атомы водорода. Такая симметричная структура не обладает вращательной способностью.

Кристаллы, состоящие из асимметричных молекул, как правило, обладают оптической активностью (например, сахара). В то же время кристаллы, построенные из неактивных молекул, также могут обладать вращательной способностью (кварц). В этом случае винтовые структуры образуются в решетке кристалла, это его коллективное свойство. При растворении или плавлении такого кристалла оптическая активность утрачивается. Кристаллы, способные вращать плоскость поляризации обязательно энантиоморфны, т.е. существуют в виде правых и левых форм. Они совершенно одинаковы, но геометрически могут быть совмещены только путем зеркального отражения (рис. 5b).

*Зеркальные изомеры* — вещества, имеющие, как правило, одинаковые химические и физические свойства: плотность, температуру плавления, показатели преломления и т.д. Основное их специфическое свойство - оптическая активность, причем левые и правые формы вращают плоскость поляризации в разных направлениях. Исследование этого свойства — единственный надежный и точный метод изучения разных форм асимметричных веществ.

В неживой природе в обычных химических реакциях правые и левые молекулы всегда образуются поровну. Такая смесь называется *рацемат*. Рацематы не вращают плоскость поляризации света, физические свойства рацемата могут отличаться от свойств чистых оптических изомеров. Так, например, температура плавления рацемата несколько ниже. В химических реакциях с участием чистого изомера или асимметричного катализатора (агента) получаются чистые изомеры.

Иная картина наблюдается в живой природе. Важнейшие биологические вещества — аминокислоты, белки, нуклеиновые кислоты, углеводы — присутствуют во всех живых организмах в виде чистых изомеров, а не рацематов. Оказалось, что в биологических процессах участвуют асимметричные агенты. Это связано со специфическим и не нашедшим пока удовлетворительного объяснения свойством живой природы строить белки из левых оптически активных изомеров аминокислот (19 из 20 жизненно важных аминокислот оказались оптически активными). Физиологическое и биохимическое действие оптически активных изомеров часто совершенно различно. Например, белки, синтезированные искусственным путем из правых аминокислот, не усваиваются организмом; бактерии способны подвергать брожению лишь один из изомеров, не затрагивая другой; левый никотин в несколько раз ядовитее правого.

Эти свойства живой природы открыты уже давно, что несомненно имеет большое общебиологическое значение, но суть этого открытия до сих пор не вполне ясна. Очевидно, что асимметрия по каким-то причинам необходима для жизни. Поэтому, раз возникнув, это свойство закрепилось в процессе эволюции. Интересно, что вещества менее важные для жизни — продукты частичной и полной переработки, резервные вещества и т.д. — встречаются в виде обоих антиподов и даже частично в виде рацематов. Другой факт — это обнаруженный процесс рацемизации при старении живого вещества. Биологами получены данные о преимуществах оптически активных живых систем по сравнению с рацемическими в таких важнейших биологических процессах, как явление роста.

Исследование оптической активности позволило решить вопрос о теории происхождения нефти. Существуют две теории — неорганическая и органическая. Обнаруженная экспериментально оптическая активность нефти и ее продуктов является важным свидетельством в пользу ее органического происхождения из



остатков растений и животных, существовавших на Земле очень давно. Если бы нефть образовалась в результате обычных химических реакций при высокой температуре и давлении на большой глубине, то она бы представляла собой рацемат и не обладала бы способностью вращать плоскость поляризации светового луча.

Возникает вопрос, каким же образом при происхождении жизни впервые выделились чистые изомеры одного типа. По этому поводу существует несколько гипотез. Для нас представляет интерес следующая гипотеза. Экспериментально установлено, что свет, поляризованный по кругу, действует на рацематы избирательно. Он может сильнее разлагать левые антиподы и способствовать синтезу одних форм больше, чем других. Поляризация солнечного света происходит при рассеянии в земной атмосфере, а также при косом падении на границу раздела воздух-морская вода. Все это и могло способствовать образованию чистых изомеров.

Удивительный феномен преимущественной роли только одной из форм оптически активных изомеров в биологических процессах может иметь фундаментальное значение для выяснения путей зарождения и эволюции жизни на Земле.

### 3. Схема эксперимента

*Поляриметром* называется прибор для измерения угла поворота плоскости поляризации монохроматического света оптически активными кристаллами, прозрачными однородными жидкостями и растворами. Поляриметры применяются в медицине, пищевой и химико-фармацевтической промышленности, в научных лабораториях.

Поляриметр построен по схеме полутеневых приборов. Измерение сводится к визуальному уравниванию яркостей двух половин поля зрения прибора и последующему считыванию показаний по шкале вращения, снабженной нониусом. Принципиальная оптическая схема полутеневого поляриметра представлена на рис. 6.

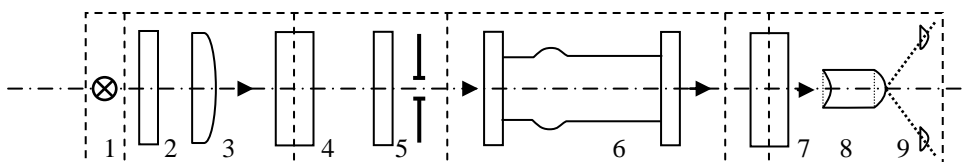
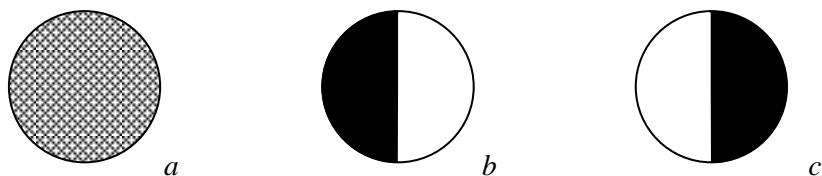


Рис. 6. Принципиальная схема полутеневого поляриметра.

1 – источник света, 2 – светофильтр, выделяющий длину волны 589 нм, 3 – конденсор, собирающий световые лучи, 4 – поляризатор, 5 – хроматическая фазовая пластинка, 6 – кювета с раствором, 7 – анализатор, 8 – объектив и окуляр с отсчётным устройством, 9 – две лупы.

Свет от лампы 1 проходит через светофильтр 2, конденсор 3 и поляризатор 4. При этом получается два луча. Один из них идет через хроматическую фазовую пластинку 5, кювету 6 и анализатор 7. Другой, минуя фазовую пластинку, проходит через кювету и анализатор. Вид поля зрения представлен на рис. 7.

Уравнивание яркостей полей сравнения осуществляется путем вращения анализатора. Измерения производятся, когда поля сравнения уравниваются при меньших яркостях, а незначительный поворот анализатора вызывает резкое нарушение



*Рис. 7. Вид поля зрения поляриметра: а) обе половинки поля имеют одинаковую освещённость (затемненность), б) и с) при малейшем повороте анализатора относительная освещённость резко меняется*

равенства яркости двух половин поля зрения. Если между поляризатором и анализатором ввести кювету с оптически активным раствором, то равенство яркостей полей сравнения нарушается. Его можно восстановить поворотом анализатора на некоторый угол, который оказывается равным углу поворота плоскости поляризации исследуемым раствором.

При измерении угла вращения плоскости поляризации правовращающими оптически активными растворами отсчеты по шкале первого отсчетного устройства и по лимбу будут в пределах от 0 до 35°; левовращающими растворами — от 360 до 325°. Разностью двух отсчетов, соответствующих равенству яркостей полей сравнения в присутствии оптически активного раствора и без него, определяется угол вращения плоскости поляризации данным раствором.

#### **4. Порядок выполнения работы**

Внимание! Торцевые грани кювет необходимо протереть ваткой, чтобы на них не оставалось следов воды и отпечатков пальцев. С кюветой следует обращаться осторожно, держать за ребра. Необязательные для выполнения задания помечены звёздочками.

##### ***1. Определение процентного содержания растворов сахара с помощью рефрактометра «РЛ».***

1.1. Ознакомиться с устройством прибора (см. приложение 2).

1.2. Нанести небольшое количество раствора на поверхность, закрыть крышку. В поле зрения трубы наблюдается резкая граница раздела света и полутени. Наведя тройной горизонтальный штрих на границу раздела, по правой шкале — шкале концентраций — снять отсчёт.

1.3. Выполнить измерения 1.2 для остальных растворов. Перед тем, как нанести следующий раствор, необходимо насухо вытереть поверхность камеры.

##### ***2. Подготовка к работе на поляриметре.***

2.1. Включить поляриметр в сеть, а затем щелкнуть тумблером на корпусе. Измерения следует начинать через 5-10 минут после включения лампы поляриметра.

2.2. Освоить процесс уравнивания полей сравнения. Для этого, не вставляя в прибор кювету, втулкой, расположенной перед окуляром, установить резкое изображение линии раздела полей сравнения. Вращением лимба добиться при меньшей яркости одинаковой полутеневого освещенности обеих половинок поля зрения до полного исчезновения границ их раздела (на сером фоне). Полученный результат должен находиться вблизи совпадения нулевого отсчета шкалы и лимба.

2.3. Для установления нулевого отсчета прибора кювету 2 длиной 5 см на 2/3 наполнить дистиллированной водой и вставив кюветное отделение поляриметра до упора вблизи источника света. Закрывать крышку прибора. Установить равномерную

яркость полей сравнения и снять отсчеты по шкале лимба и отсчетного устройства. Процесс выравнивания яркостей повторить трижды и вычислить среднее арифметическое значение отсчетов. Полученный результат будет нулевым отсчетом поляриметра.

**3. Определение величины удельного вращения раствора сахара в воде.**

3.1. Вылить воду из кюветы и наполнить ее раствором сахара с наименьшей концентрацией. Вставить кювету в поляриметр и вновь уравновесить яркости полей сравнения. Оценить угол поворота  $\theta$  плоскости вращения в. Для этого определить на сколько градусов относительно нулевого отсчета лимба повернется шкала, а затем по штрихам лимба, лучше всего совпадающим с любым делением круговой шкалы, отсчитать доли градуса. Цена деления отсчетного устройства  $0,02^\circ$ . Измерение угла поворота в выполнить не менее трех раз и среднее арифметическое значение в записать в таблицу, учтя нулевой отсчёт поляриметра из 1.3.

Вылить содержимое кюветы в соответствующий по концентрации сосуд.

3.2. Последовательно увеличивая концентрацию раствора сахара, провести измерения угла поворота в для всех имеющихся в наборе растворов. Результаты измерения записать в таблицу.

$l$	$C, \%$	$\theta$	$[\alpha]$

3.3. Построить градуировочный график зависимости угла поворота  $\theta$  от концентрации раствора  $C$ . По наклону кривой графика определить величину удельного вращения  $[\alpha]$  (в град/мм).

3.4. Для каждой концентрации раствора вычислить по формуле (4) и занести в таблицу величину удельного вращения  $[\alpha]$ . Найти среднее арифметическое значение  $[\alpha]$  и абсолютную погрешность измерения. Сравнить величины  $[\alpha]$ , определенные двумя способами.

**4\*. Определение неизвестной концентрации раствора сахара  $C_x$ .**

4.1. Заполнить кювету на  $2/3$  длины раствором сахара неизвестной концентрации. Выполнить измерение угла поворота  $\theta$

4.2. По градуировочному графику определить неизвестную концентрацию раствора  $C_x$ .

**5\*. Изучение зависимости угла вращения плоскости поляризации раствора сахара от размеров кюветы (т.е. от длины пути, проходимого светом в активном веществе).**

5.1. Взять раствор сахара с произвольной концентрацией. Последовательно наполнить раствором кюветы различной длины ( $l = 1 \text{ см}, 3 \text{ см}, 5 \text{ см}$ ). Выполнить измерения угла поворота плоскости поляризации в с учетом нулевого отсчета. Результаты измерений представить в виде таблицы.

5.2. Построить график зависимости  $\theta$  от  $l$ . Убедиться в справедливости формулы (4).

**6\*. Определение угла вращения плоскости поляризации активной жидкости в круглой кювете.**

6.1. Установить кювету с жидкостью в поляриметр. Проследите, чтобы пузырек воздуха оказался в изгибе кюветы и находился дальше от источника света. Определите угол вращения плоскости поляризации  $\theta$ .

6.2. Вычислите вращательную способность единицы длины активной жидкости  $a = \frac{\theta}{l}$ . Длина  $l$  указана на кювете.

**7\*. Изучение вращения плоскости поляризации пластинкой кристалла кварца.**

- 7.1. Установите держатель с пластинкой в поляриметр.
- 7.2. Измерьте величину угла поворота плоскости поляризации  $\theta$ .
- 7.3. Оцените толщину пластинки кварца  $l$  в месте прохождения поляриметра, используя полученные результаты и формулы (2) и (3).

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое свет по современным представлениям? Дайте определение, напишите формулы, изобразите на чертеже электромагнитную волну.
2. Поляризация света. Как получить поляризованный свет?
3. Линейная, круговая и эллиптическая поляризации света.
4. Вращение плоскости поляризации света твердыми веществами и растворами. Как можно объяснить это явление?
5. Расскажите о молекулярных и кристаллических оптически активных веществах. Почему они обладают способностью вращения плоскости поляризации?
6. В чем заключается суть метода поляриметрии?

### **Список литературы**

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978.-480с.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике,- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.- 944 с.
3. Жевандров Н.Д. Анизотропия и оптика.- М.: Наука. 1974.-348с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов .-М.: Высш. шк., 1994.-542с.

## Приложение 1

Пусть свет проходит в веществе некоторый путь  $x$ . Результирующий вектор напряженности  $\vec{E}$  повернется на некоторый угол  $\theta$ , который зависит от разности фаз двух волн с правой и левой круговой поляризацией:

$$\theta = \frac{\varphi_+ - \varphi_-}{2}, \quad (1.1)$$

здесь  $\varphi_+$  и  $\varphi_-$  — фазы волн с соответствующей поляризацией.

В соответствии с формулой (1) и выражением для волнового числа  $k = \frac{\omega}{V}$  можно записать:

$$\begin{aligned} \varphi_+ &= \omega t - kx_+ = \omega t - \frac{\omega}{V_+} x_+ = \omega \left( t - \frac{x_+}{V_+} \right), \\ \varphi_- &= \omega \left( t - \frac{x_-}{V_-} \right) \end{aligned} \quad (1.2)$$

Приняв, что  $x_+ = x_- = l$ , где  $l$  — длина пути света в веществе, подставим выражения для  $\varphi_+$  и  $\varphi_-$  из (1.2) в формулу (1.1). При этом учтем, что  $V = \frac{c}{n}$  и

$\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{Tc} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ , где  $\lambda_0$  — длина волны в вакууме. В результате получим

$$\theta = \frac{\varphi_+ - \varphi_-}{2} = \frac{\omega l}{2c} (n_- - n_+) = \frac{\pi l}{\lambda_0} (n_- - n_+) \quad (1.3)$$

Формула (1.3) показывает, что для веществ, у которых  $n_- > n_+$ , плоскость поляризации поворачивается вправо:  $\theta > 0$ . Если  $n_- < n_+$ , плоскость поляризации поворачивается влево:  $\theta < 0$ .

## Приложение 2

### Измерение показателей преломления жидких и твердых тел с помощью рефрактометра Аббе.

Технический рефрактометр Аббе служит для быстрого и сравнительно глубокого измерения показателей жидких твердых тел.

Устройство рефрактометра Аббе основано на явлении полного внутреннего отражения.

Пусть луч света падает на границу двух сред со стороны оптически более плотной среды ( $n = n_2$ ). Для углов падения  $r$ , меньше некоторого  $r'$ , свет частично проникает в оптически менее плотную среду ( $n = n_1$ ), а частично отражается. При  $r' \leq r \leq 90^\circ$  преломленный луч отсутствует и наступает полное отражение. Предельный угол  $r'$  соответствует углу преломления  $i = 90^\circ$ , и следовательно,

$$\sin r' = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.1)$$

Зная показатель преломления одной из сред и определяя на опыте предельный угол, можно с помощью (2.1) определить показатель преломления второй среды.

Пусть теперь свет падает на границу раздела с оптически менее плотной среды. В зависимости от угла падения луч во второй среде может представлять с нормалью углы, расположенные в интервале от нуля до  $r'$ , предельный угол преломления  $r'$  соответствует углу падения  $i = 90^\circ$  (скользящий луч). Легко видеть, что величина предельного угла и в этом случае определяется формулой (2.1).

При измерениях показателя преломления с помощью рефрактометра Аббе можно пользоваться как методом полного внутреннего отражения, так и методом скользящего луча.

Оптическая схема рефрактометра представлена на рис. 1-1.

Основной его частью являются две стеклянные прямоугольные призмы  $P_1$  и  $P_2$ , изготовленные из стекла с большим показателем преломления. В разрезе призмы имеют вид прямоугольных треугольников, обращенных друг к другу гипотенузами, зазор между призмами имеет ширину около 0,1 мм и служит для помещения исследуемой жидкости.

Ход лучей при работе по методу скользящего луча изображен на рис. 1-2. Свет проникает в призму  $P_1$  через грань  $ef$  и попадает в жидкость через матовую грань  $ed$ . Свет рассеянный матовой поверхностью, проходит слой жидкости и под всевозможными углами ( $0^\circ \leq i \leq 90^\circ$ ) падает на сторону  $ac$  призмы  $P_2$ .

Скользящему лучу в жидкости ( $i = 90^\circ$ ) соответствует предельный угол преломления  $r'_1$ . Преломленные лучи с углами больше  $r'_1$  не возникают. В связи с этим угол  $i_2$  выхода лучей из грани  $ab$  может измениться лишь в интервале от некоторого значения  $i'_2$  до  $90^\circ$ .

Если свет, выходящий из грани  $ab$ , пропустить через собирающую линзу  $L_1$ , то в ее фокальной плоскости наблюдается резкая граница света и темноты. Граница рассматривается с помощью линзы  $L_2$ . Линзы  $L_1$  и  $L_2$  образуют зрительную трубу, установленную на бесконечность. В их общей фокальной плоскости расположен крест, образованный тонкими нитями. Положение границы в фокальной плоскости линз зависит от величины показателя преломления жидкости  $n_1$ . Вращая трубу относительно призм, можно совмещать границу света и тени с крестом. В этом

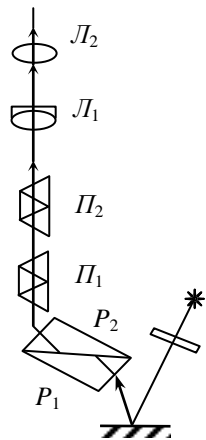


Рис. 1-1. Оптическая схема рефрактометра

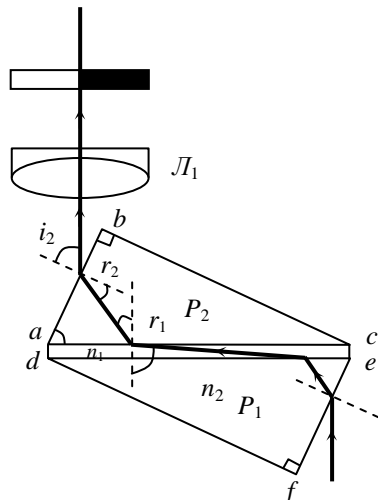


Рис. 1-2. Ход лучей в призмах при использовании метода скользящего луча

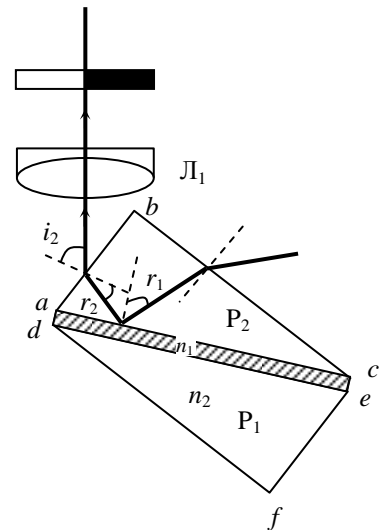


Рис. 1-3. Ход лучей при использовании метода полного внутреннего отражения

случае измерение показателя преломления сводится к измерению угла  $i'_2$ , образованного нормалью к грани  $ab$  и оптической осью зрительной трубы. В современных приборах труба укрепляется неподвижно, а оправка с призмами может поворачиваться. С оправкой скреплен указатель, перемещающийся по лимбу. Лимб градуируется непосредственно в значениях показателя преломления.

При измерении показателя преломления жидкости методом полного внутреннего отражения призму  $P_2$  освещают со стороны грани  $bc$  (рис. 1-3) через специальное отверстие в кожухе прибора. Грань  $bc$  делается матовой. Свет в этом случае падает на границу раздела  $ac$  под всевозможными углами. При  $r_1 > r'_1$  наступает полное внутреннее отражение, при  $r_1 < r'_1$  свет отражается лишь частично. В поле зрения трубы наблюдается при этом резкая граница света и полутени. Так как условия, определяющие величину предельного угла в методе скользящего луча и в методе полного отражения совпадают, положение линии раздела в обоих случаях так же оказывается одинаковым.

Заметим, что в методе полного внутреннего отражения можно измерять показатели преломления непрозрачных веществ в отличие от метода скользящего угла.

Рефрактометр Аббе можно использовать и для измерения показателей преломления твердых тел. И в этом случае применимы как метод скользящего луча, так и метод полного внутреннего отражения.

Исследуемый образец должен иметь плоскую полированную поверхность, этой поверхностью он прижимается к гипотенузе  $ac$  призмы  $P_2$  (призма  $P_1$  при этом отклоняется в сторону). Для обеспечения оптического контакта в зазор между соприкасающимися поверхностями вводится тонкий слой жидкости, показатель преломления  $n$  который удовлетворяет условию:  $n_1 \leq n \leq n_2$ . При выполнении этого условия наличие слоя жидкости не искажает результатов измерения. (Студентам предлагается самостоятельно разобраться в этом вопросе.) Обычно для создания оптического контакта используют монобромнафталин, показатель преломления которого для желтых линий натрия равен 1,66.

При работе по методу скользящего луча (рис. 1-4) образец должен иметь боковую полированную поверхность, сквозь которую в нее проникает свет.

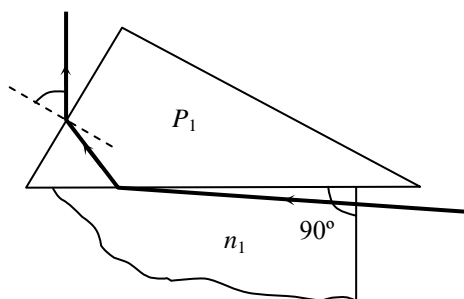


Рис. 1-4. Измерение показателя преломления твёрдых тел методом скользящего луча

Изложенная теория рефрактометра Аббе, строго говоря, справедлива лишь в том случае, когда свет является монохроматическим. Дисперсия исследуемого вещества и стекла призмы приводит к тому, что величина предельных углов  $r_1'$  и  $i_2'$  зависит от длины волны  $\lambda$ . При работе с белым светом, наблюдаемая граница света и темноты (или света и полутени) часто оказывается размытой и окрашенной. Для того чтобы получить и в этом случае резкое изображение, перед объективом трубы помещают компенсатор с переменной

дисперсией. Компенсатор содержит две одинаковых дисперсионных призмы Амичи (призмы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  (рис. 1-1)), каждая из которых состоит из трех склеенных призм, обладающих различными показателями преломления и различной дисперсией. Призмы рассчитываются так, чтобы монохроматический луч с длиной волны  $\lambda_D = 5893 \text{ \AA}$  (среднее значение длины волны желтого дублета натрия) не испытывал отклонения. Лучи с другими длинами волн отклоняются в ту или иную сторону. Если положение призм соответствует рис. 1-1, то дисперсия двух призм равна удвоенной каждой из них. При повороте одной из призм Амичи на  $180^\circ$  относительно другой (вокруг вертикальной оси) полная дисперсия компенсатора оказывается равной нулю, так как дисперсия одной из призм скомпенсирована другой. В зависимости от взаимной ориентации призм дисперсия компенсатора изменяется таким образом в пределах от нуля до удвоенного значения дисперсии одной призмы.

Для поворота призм относительно друг друга служит специальная рукоятка и система конических шестерен, с помощью которых призмы одновременно поворачиваются в противоположных направлениях. Вращая ручку компенсатора, следует добиваться того, чтобы граница света и тени в поле зрения стала достаточно резкой. Положение границы при этом соответствует длине волны  $\lambda_D$  для которой обычно и приводится значения показателя преломления  $n_D$ .

В некоторых случаях, в тех именно, когда дисперсия исследуемого вещества особенно велика, диапазон компенсатора оказывается недостаточным и четкой границы получить не удастся. В этом случае рекомендуется устанавливать перед осветителем желтый светофильтр  $F$ .

Приступая к измерениям, необходимо прежде всего убедиться в правильной работе прибора. Такую проверку проще всего выполнить, измерив показатель преломления вещества с известным показателем преломления. Для этого к каждому прибору прилагается эталонная стеклянная пластинка с известным  $n_D$ . В правильности работы можно убедиться и в отсутствие такой пластинки, измеряя, например, показатель преломления дистиллированной воды, для которой (при  $T = 20^\circ \text{ C}$ )  $n_D = 1,33291$ . Если измерение дает другой результат, следует определить поправку к шкале.

При визуальном совмещении границы раздела света и тени с серединой креста нити наблюдатель, вообще говоря, допускает небольшие ошибки, в результате которых измерение значения для одного и того же вещества в разных опытах не вполне точно совпадают между собой (случайный разброс). Рекомендуется поэтому проводить в каждом случае несколько измерений показателя преломления и определить средние значения.



## Литература

Кулаков Н. Н. "Руководство к практическим занятиям в физической лаборатории" стр. 125 -127.

Ландсберг Г. С. "Оптика" стр. 400 - 404.

Богданов Т. Н., Субботина Е. Л. "Руководство к практическим занятиям по физике"

### Задача работы:

- 1) Ознакомиться с устройством рефрактометра РЛ и принципом работы.
- 2) Определить процентное содержание ряда растворов сахара.

### Описания и инструкция пользования рефрактометром лабораторным типа "РЛ" изготовленным киевским заводом контрольно-измерительных приборов «Главпищемаш» МПГ СССР.

#### I. Характеристика

1. Тип: "РЛ" - рефрактометр лабораторный.
2. Назначение - рефрактометр "РЛ" предназначается для определения коэффициента преломления жидкостей и определения рефрактометрическим методом процентного содержания сахара в сахарных растворах.
3. Пределы измерения:
  - А) по шкале сухих веществ (по сахарозе в процентах)  $0 \div 95$ .
  - Б) по шкале коэффициентов преломления  $1,300 \div 1,540$
4. Цена деления:
  - А) шкалы сухих веществ в интервалах –  
От 0 до 50 0,2 %  
От 50 до 95 0,1%
  - Б) шкалы коэффициентов преломления  $1 \cdot 10^{-3}$
5. Максимальная средняя дисперсия измеренной жидкости, которая может компенсироваться прибором, составляет - 0,00905
6. Допустимая погрешность показаний:
  - А) шкалы сухих веществ  $\pm 1$  деление
  - Б) шкалы коэффициентов преломления  $\pm 0,5$  деления
7. Чувствительность прибора должна быть в пределах цены деления шкалы сухих веществ.
8. Температура градуировки прибора 20 °С.
9. Источник света - дневной свет или электролампа 70 ÷ 100 ватт
10. Габаритные размеры прибора в миллиметрах 178x218x412.
11. Вес прибора - 6 кг.

#### II. Описание прибора

Принцип действия рефрактометра основан на использовании явлений полного внутреннего отражения или преломления света.

Рефрактометры применяются в пищевой, химической, нефтяной и других отраслях промышленности.

Исследуемый раствор помещается в приборе между двумя призмами, изготовленными из оптического стекла с показателем преломления большим, чем у испытуемых растворов.

Лучи дневного или искусственного света при помощи зеркала 11 направляются в окно измерительной призмы (при исследовании темных и

окрашенных растворов) или в окно осветительной призмы (при исследовании прозрачных растворов).

При переходе из среды с большим показателем преломления (стекла) в среду с меньшим показателем преломления (раствор) лучи, падающие под углами, большими угла полного внутреннего отражения — полностью отражаются, а лучи, падающие под меньшими углами — полностью преломляются и проходят в исследуемый раствор.

При наблюдении в зрительную трубу, расположенную за измерительной призмой, при установке оптической оси трубы, в области крайних пучков, прошедших в исследуемый раствор, поле зрения оказывается разделенным на две части - освещенную и темную. Причем положение темной линии раздела между освещенной и темной частями поля зрения находится в зависимости от показателя преломления испытуемого раствора.

Прибор имеет две шкалы, расположенные концентрично. Одна из них отградуирована по показателям преломления, другая в процентах сахара, содержащегося в одном растворе (по сахарозе).

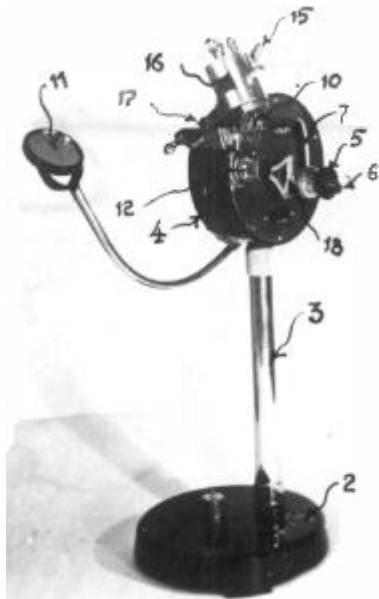


Рис. 1-5. Внешний вид рефрактометра «РЛ»

Конструктивно прибор оформлен следующим образом. Корпус прибора (4), имеющий форму круглой коробки, укреплен на колонке (3), снабженной массивным основанием (2).

В верхней левой части корпуса помещена полная камера с осветительной и измерительной призмами.

Нижняя половина камеры с измерительной призмой жестко закреплена на корпусе, а верхняя половина камеры с осветительной призмой имеет возможность поворачиваться на шарнире (10) относительно измерительной призмы.

В корпусе укреплена ось рукоятки (6), с которой жестко связан кронштейн и закреплённый на нём объектив, отражательная призма и сетка зрительной трубы (индекс). Окуляр зрительной трубы (5) укреплен непосредственно в теле рукоятки.

Для уничтожения дисперсии света перед объективом зрительной трубы в качестве компенсатора установлена призма прямого зрения, которая при помощи головки компенсатора (12) может вращаться вокруг своей оси. Отсчёт угла поворота компенсатора производится по шкале, нанесённой на секторе (18).

Между сеткой и окуляром зрительной трубы непосредственно на наружной крышке корпуса установлена плоскопараллельная стеклянная пластина (7), на которой по радиусу перемещения окуляра нанесены две шкалы: шкала показателей преломления и шкала процентного содержания сахара

Для поддержания постоянной температуры через полую камеру пропускается вода соответствующей температуры. Отсчет температуры воды производится по термометру (15), установленному в полую камеру при помощи штуцера (14).