

Лабораторная работа №5

СВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СКАМЬЕ

Оборудование: фотометрическая скамья с контрастным фотометром, источники света.

Описание целей работы.

п./п.	Конкретная цель	Критерий достижения цели
1	Описание фотометрических величин.	Провести сравнение энергетических и световых величин.
2	Спектральная чувствительность глаза.	Решить одну из задач по выбору преподавателя
3	Изучение принципа работы визуального фотометра.	а) Начертить принципиальную схему простейшего фотометра; б) Указать источники ошибок измерения; в) Начертить ход лучей через кубик Люммера - Бродхуна и контрастный фотометр.
Практические умения		
4	Определение силы света источника	Студент должен научиться: а) отъюстировать установку; б) правильно установив фотометрическое равновесие; в) подсчитать силу света исследуемого источника.

Способы регистрации электромагнитных волн оптического диапазона основаны на измерении потока энергии, переносимой волной. Раздел оптики, связанный с измерением энергии оптического излучения называется фотометрией.

Фотометрические величины характеризуют энергию оптического излучения. Следует различать общие энергетические величины, характеризующие любое электромагнитное излучение и специфические фотометрические или световые величины, выработанные практикой визуальных измерений.

1.1. Энергетические фотометрические величины.

1. Энергия излучения, W (Дж).
2. Основным энергетическим понятием фотометрии является поток излучения Φ_{Σ} , имеющий смысл мощности, переносимой электромагнитным излучением:

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{dW}{dt} \text{ (Вт)}.$$

3. Объекты, излучающие свет (источники) разделяют на точечные и неточечные (протяженные). Точечным называют источник, размерами которого можно пренебречь в условиях задачи. Чаще всего это возможно, если размеры источника много меньше (в 10 или более раз) расстояния до точки наблюдения.

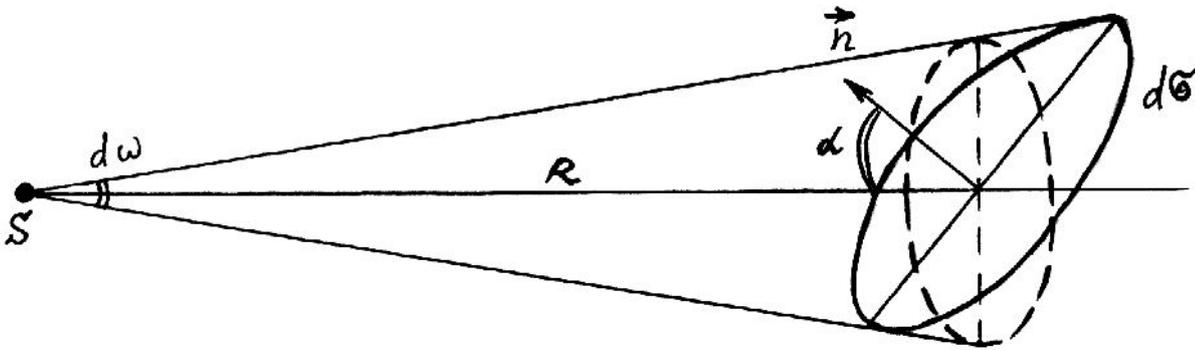


Рис.1.

Поместим точечный источник света в вершине телесного угла (рис.1). Лучи света, попавшие в пространственный угол $d\omega$ в однородной среде, будут распространяться внутри него, а лучи, не попавшие в этот угол, в дальнейшем не могут в него попасть (закон прямолинейного распространения света).

Телесный угол характеризуется отношением площади поверхности σ , вырезаемой на сфере конусом с вершиной в центре сферы, к квадрату её радиуса R :

$\omega = \sigma / R^2$. Единица пространственного угла - стереометрический радиан (стерадиан - ср) - телесный угол, опирающийся на часть сферы, площадь которой равна квадрату радиуса сферы. Полный телесный угол:

$$\omega_0 = 4\pi R^2 / R^2 = 4\pi \text{ ср}.$$

Силой излучения или энергетической силой света $J_{\text{э}}$ называется отношение потока излучения $d\Phi_{\text{э}}$, распространяющегося по данному направлению в некотором телесном угле $d\omega$ к величине этого угла:

$$J_{\text{э}} = \frac{d\Phi_{\text{э}}}{d\omega} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{ср}} \right).$$

Эта величина полностью характеризует излучение точечного источника.

Если источник излучает по всем направлениям равномерно, то полный поток излучения $\Phi_{\text{э}} = 4\pi J_{\text{э}}$. Полный поток излучения характеризует данный источник; этот поток нельзя увеличить никакими оптическими системами, его можно только перераспределить.

Для характеристики протяженного источника вводят ещё две энергетические величины: яркость и светимость.

4. Энергетической светимостью $M_{\text{э}}$ называется отношение потока излучения, исходящего от элемента поверхности источника по всем направлениям, к площа-

ди этого элемента dS :

$$M_{\vartheta} = \frac{d\Phi_{\vartheta}}{dS} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right).$$

5. Энергетическая яркость L_{ϑ} определяется потоком излучения $d\Phi_{\vartheta}$, посылаемым единицей видимой поверхности источника по данному направлению θ внутрь единичного телесного угла:

$$L_{\vartheta} = \frac{d\Phi_{\vartheta}}{dS \cos\theta d\omega} = \frac{J}{dS \cos\theta} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}} \right).$$

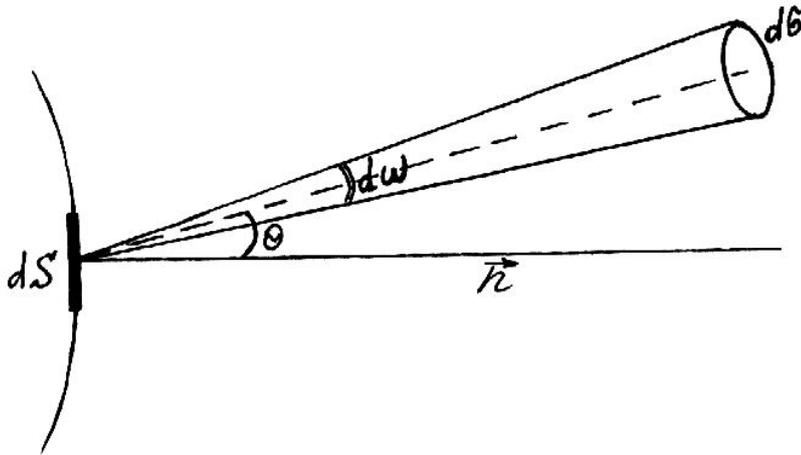


Рис.2.

Из всех фотометрических характеристик источника света яркость наиболее непосредственно связана со зрительными ощущениями, т.к. освещенность изображения источника света на сетчатке глаза пропорциональна яркости излучающей поверхности по направлению наблюдения. Если человек смотрит на источник света (свеча, фонарь, Солнце, освещенный объект и др.), то его зрительное ощущение зависит от количества энергии, попадающего на сетчатку глаза. В этом случае площадка $d\sigma$ на рис.2 определяется размером глазного зрачка.

Источники, яркость которых одинакова по всем направлениям, называются ламбертовскими. В этом случае $J_{\vartheta} = L_{\vartheta} dS \cos\theta$, т.е. сила излучения пропорциональна видимой по данному направлению площади $dS \cos\theta$ элемента светящейся поверхности.

6. Энергетической освещенностью E_{ϑ} некоторой поверхности называют отношение потока излучения, приходящегося на элементарный участок поверхности, к площади этого участка $d\sigma$:

$$E_{\vartheta} = \frac{d\Phi_{\vartheta}}{d\sigma} \left(\text{Вт}/\text{м}^2 \right).$$

Освещенность показывает, какая энергия попадает в единицу времени на единицу освещаемой поверхности. Если поверхность освещается точечным источником, то освещенность поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до поверхности (см. Рис.1):

$$E_3 = \frac{d\Phi_3}{d\sigma} = \frac{Jd\omega}{d\sigma} = \frac{Jd\sigma \cos\alpha}{R^2 d\sigma} = \frac{J \cos\alpha}{R^2},$$

где α - угол, образованный нормалью \vec{n} к площадке $d\sigma$ с направлением на источник (угол падения).

Для того чтобы оценить количество энергии в потоке излучения, необходимо его зафиксировать каким-либо приемником.

Все приведённые характеристики связаны с объективным восприятием энергии, например термоэлементом. Но гораздо чаще свет воспринимается селективными приборами, такими, как фотоэлемент, фотопластинка и, особенно, человеческий глаз. Такие приборы имеют различную чувствительность к разным частям спектра. Поэтому приходится считаться с тем, что одна и та же мощность на разных частотах вызывает совершенно различную реакцию приёмника.

1.2. Спектральная чувствительность глаза.

Наиболее старый метод измерения энергии излучения в видимой области - визуальный. Здесь приемником излучения является глаз, а основным способом количественных измерений - визуальное уравнивание яркости двух фотометрических полей: стандартного и измеряемого. В этом случае необходимо принимать во внимание тот факт, что глаз воспринимает только узкий участок длин волн от 400 до 800 нм, называемый "светом". Поэтому обычно говорят не о восприятии энергии глазом, а о световом восприятии и вводят специальную фотометрическую систему единиц (световые величины), приспособленную к свойствам глаза человека.

Чувствительность глаза к свету различной длины волны можно охарактеризовать кривой видности $V(\lambda)$ (см. рис.3).

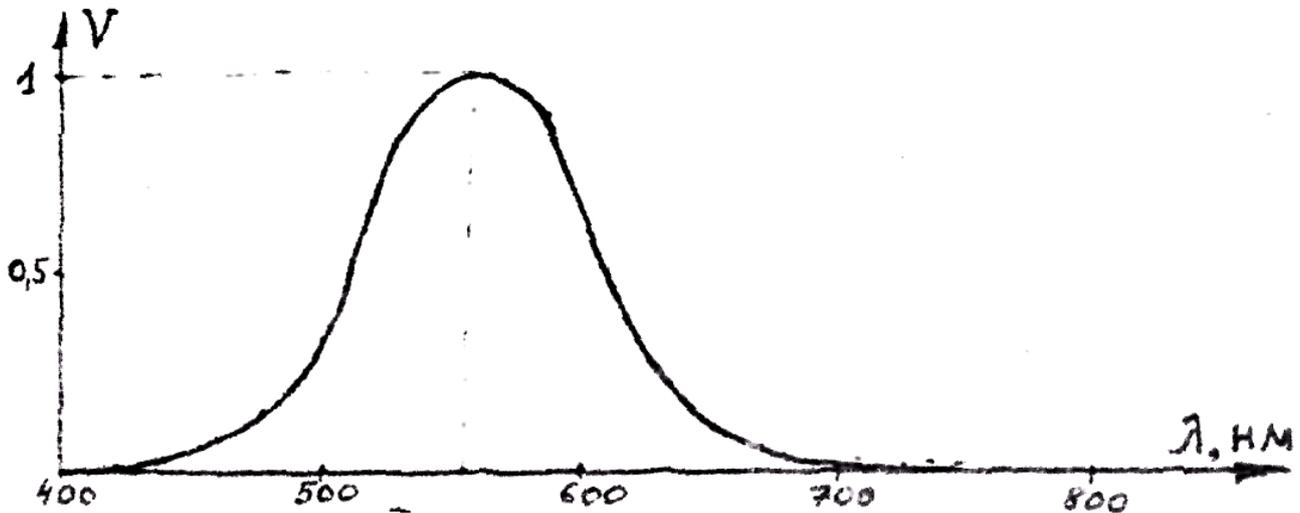


Рис. 3.

Относительная чувствительность глаза $V(\lambda)$ обратно пропорциональна мощностям монохроматического излучения, дающим одинаковые зрительные ощущения. Несмотря на субъективность таких оценок, кривая видности мало меняется при переходе от одного наблюдателя к другому. На основании многочисленных измерений установлена кривая видности, характеризующая средний нормальный глаз (рис.3.). В таблице I приведены численные значения ординат этой кривой. Наиболее

чувствителен глаз к излучению с $\lambda = 555$ нм (зелёный свет). Реакция глаза для этой длины волны условно принимается за единицу. Для красно-оранжевого света ($\lambda = 610$ нм) $V = 0.5$, т.е. для получения одинакового с зеленым зрительного ощущения поток излучения должен быть вдвое мощнее. Для $\lambda = 760$ нм, $V = 0,00006$, т.е. одинаковое по силе с зеленым светом ощущение вызывается мощностью в ~ 20000 раз большей.

Таблица I

λ , нм	$V(\lambda)$	λ , нм	$V(\lambda)$	λ , нм	$V(\lambda)$
400	0,0004	520	0,710	640	0,175
410	0,0012	530	0,862	650	0,107
420	0,0040	540	0,954	660	0,061
430	0,0116	550	0,995	670	0,032
440	0,023	560	0,995	680	0,017
450	0,060	570	0,870	690	0,0082
460	0,038	580	0,952	700	0,0041
470	0,091	590	0,757	710	0,0021
480	0,139	600	0,631	720	0,00105
490	0,208	610	0,503	730	0,00052
500	0,323	620	0,381	740	0,00025
510	0,503	630	0,265	750	0,00012
				760	0,00006

1.3. Световые фотометрические величины.

1. Основной величиной является световой поток Φ , определяемый как поток лучистой энергии, оцениваемый по зрительному ощущению. Измеряется в люменах (лм). Для $\lambda = 555$ нм (максимум чувствительности глаза) световому потоку в 1 лм соответствует мощность равная $\sim 0,00160$ Вт.

Для реализации определенного светового потока служит условный световой эталон. В качестве эталона выбрано излучение абсолютно черного тела при температуре затвердевания чистой платины (2046.6 К).

2. Сила света, $J = \frac{d\Phi}{d\omega}$ - световой поток, посылаемый источником в данном направлении и отнесенный к единице телесного угла (характеризует точечный источник света). Единица измерения силы света - кандела (кд) - является основной светотехнической единицей СИ. Кандела - это сила света, испускаемого с $1/60$ см² поверхности эталонного источника в направлении нормали. За один люмен принимается световой поток от точечного источника силой света 1 кд, распространяющийся в пределах телесного угла 1 ср: $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$.

3. Единица освещенности, люкс (лк), есть освещенность, соответствующая потоку в 1 лм, равномерно распределенному по площадке в 1 м²:

$$E = \frac{d\Phi}{d\sigma}; \quad 1 \text{ лк} = 1 \text{ лм} / 1 \text{ м}^2.$$

4. Светимость $M = \frac{d\Phi}{dS}$ так же как и освещенность, выражается в лм/м², но

она характеризует излучаемый поток, а не получаемый.

5. Единицей яркости служит яркость площадки, дающая силу света в 1 кд с каждого квадратного метра в направлении, перпендикулярном к площадке (кд/м²). Единица 1 кд/м² иногда называется “нит”.

6. Световой энергией или количеством света W называют произведение светового потока на время его действия: $dW = \Phi dt$ или $W = \int \Phi dt$. Единица измерения: 1 лм*с.

Таблица 2
СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН

Энергетические величины	Единицы	Световые величины	Единицы
Энергия излучения	Дж	Световая энергия	Лм*с
Поток излучения $\Phi_{\text{Э}}$	Вт	Световой поток Φ	лм
Сила излучения $J_{\text{Э}}$	Вт/ср	Сила света J	кд
Энергетическая яркость $L_{\text{Э}}$	Вт/ср*м ²	Яркость L	кд/м ²
Энергетическая светимость $M_{\text{Э}}$	Вт/м ²	Светимость M	лм/м ²
Энергетическая освещенность $E_{\text{Э}}$	Вт/м ²	Освещенность E	лк

Упражнения.

1. По кривой видности рассчитайте мощность светового потока в 1 лм, если свет монохроматический и длина волны равна 520 нм.
2. Какой поток энергии соответствует световому потоку в 100 лм, образованному излучением, для которого относительная спектральная чувствительность глаза $V = 0,762$?
3. Какой световой поток соответствует потоку энергии 1,00 Вт, образованному излучением, для которого относительная спектральная чувствительность глаза $V = 0,342$?
4. Допустим, что связанный со световой волной поток энергии распределен равномерно по длинам волн, т.е. $\frac{d\Phi_{\text{Э}}}{d\lambda} = const$. Как выглядела бы в этом случае кривая распределения светового потока по длинам волн?
5. Допустим, что световой поток распределен равномерно по длинам волн в интервале от 400 нм до 760 нм (см. рис 4.)

- а) Как выглядел бы в этом случае график функции распределения световой энергии по длинам волн?
 б) Возможно ли такое распределение?

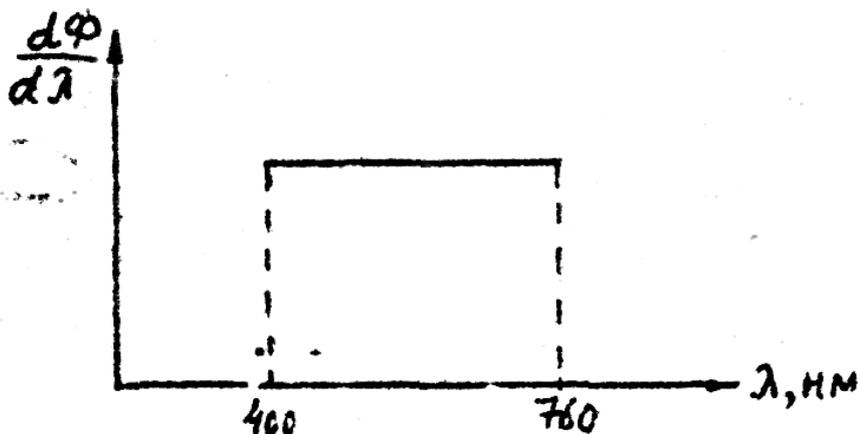


Рис.4.

1.4. Световые измерения (фотометрия).

Визуальные фотометрические измерения сводятся к сравнению освещенностей двух световых полей: эти освещенности создаются двумя источниками света, один из которых является эталонным. Человеческий глаз на основании зрительного ощущения не может установить, во сколько раз один световой поток больше другого, но с большой степенью точности определяет равенство освещенностей двух соседних полей при условии, что они освещены светом одинакового спектрального состава. Приборы, позволяющие создавать такие рядом расположенные поля, освещаемые разными источниками, носят название фотометров. Для достижения равенства освещенностей применяются разнообразные приемы, ведущие к ослаблению освещенности, создаваемой более сильным источником. Принципиально наиболее простым является изменение расстояния от источника до фотометра. Другим способом ослабления потока могут служить фильтры, системы поляризационных призм, вращающийся диск с вырезом и др.

Уравнивая тем или другим способом освещенности, создаваемые сравниваемыми источниками, мы находим отношение сил света источников $\frac{J_1}{J_2}$. Если сила света одного из источников известна (эталонный источник), то можно определить силу света второго источника в выбранном направлении, а также другие фотометрические величины.

1.5. Простейший фотометр.

Во всяком фотометре рассматривается некоторое поле, одна часть которого освещена только одним источником, а другая - только другим. При этом надо позаботиться о том, чтобы обе части освещались источниками под одним и тем же углом; глаз наблюдателя также должен рассматривать оба поля под одинаковыми углами. На рисунке 5 изображена схема простейшего (школьного) фотометра, Внутри зачерненной трубки помещена белая призма MNP , освещаемая источниками S_1 и S_2 . Призма рассматривается глазом наблюдателя A . Меняя расстояние от источников до призмы, можно уравнивать освещенности поверхностей MP и NP .

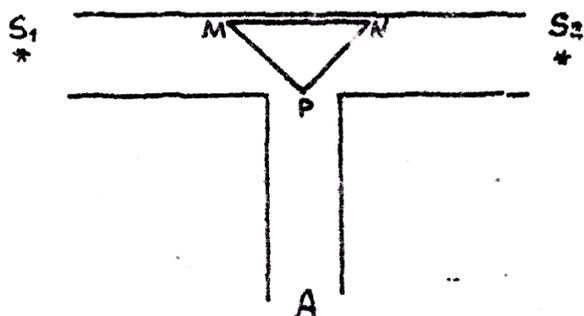


Рис.5.

Вопросы:

1. На чем основаны визуальные фотометрические измерения?
2. Сформулируйте основные условия для осуществления фотометрических измерений.
3. Объясните принцип действия простейшего фотометра.

4. Почему необходимо строго выполнять требования к симметричности установки?
5. Как изменятся возможности прибора, если призма MNP будет зеркальной? черной? серой? цветной?

1.6. Фотометр Люммера-Бродхуна

Наибольшее распространение получил фотометр Люммера-Бродхуна (рис.6). Основным его элементом является кубик Люммера, образованный двумя сложенными вместе прямоугольными призмами. Грань одной из них отшлифована по краям таким образом, что касание между призмами осуществляется только в средней части поверхностей на участке $ав$ (рис.6а). На этом участке призмы отполированы настолько хорошо, что образуют оптический контакт, т.е. ведут себя подобно сплошному прозрачному телу. Следовательно, свет проходит через контакт, не испытывая ни отражения, ни преломления. Предельный угол для стекла меньше 45° , поэтому вне области оптического контакта лучи в обеих призмах претерпевают полное внутреннее отражение и в соседнюю призму не проникают. Схема фотометра, с применением кубика Люммера показана на рисунке 6б. Здесь S_1 и S_2 - сравниваемые источники света. Белая непрозрачная пластина P рассеивает упавший на нее свет диффузно (равномерно по всем направлениям). Часть рассеянного света падает под разными углами на зеркальные поверхности P_1 и P_2 , которые отражают его на грани $вс$ и dp фотометрического кубика. Идущий от кубика в зрительную трубу пучок света образован в средней части лучами, идущими от P_1 , а во внешней части - лучами, идущими от P_2 . В результате наблюдатель увидит два концентрических поля сравнения неодинаковой яркости. Если освещенность пластинки P с обеих сторон одинакова, то граница между полями сравнения исчезает

(фотометрическое равновесие). Зная силу света одного из источников и измерив расстояния S_1P и S_2P можно найти силу света второго источника. (При этом необходимо, чтобы обе стороны приемной пластины P были симметричны и одинаково отражали свет!!!).

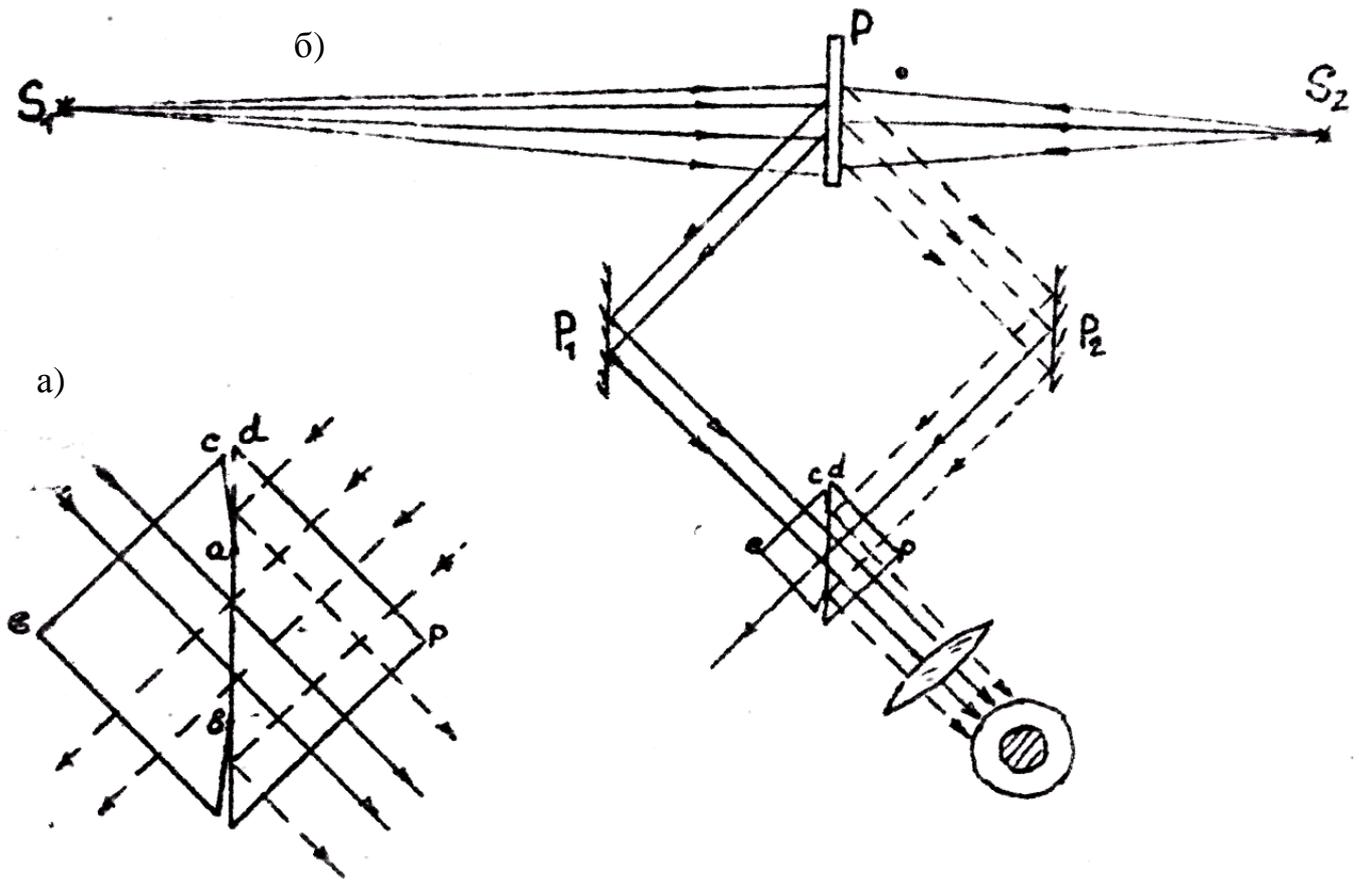


Рис.6.

В выполняемой работе применяется контрастный фотометр Люммера - Бродхуна. В контрастном фотометре кубик также сложен из двух прямоугольных призм A и B (см. рис. 7а). С прилегающей поверхности кубика A в частях r_1 , r_2 и r'_2 снимается слой стекла так, что свет, идущий через сложенный кубик образует четыре световых поля: r_1 , r_2 , l_1 , l_2 (см. рис.7б), Катетные поверхности призмы почти до середины покрываются стеклянными пластинками bd и mn . (рис. 7а). При одинаковой освещенности и при отсутствии стеклянных пластинок все четыре поля видны как одна равномерно светящаяся поверхность. При наличии пластинок световые потоки, образующие поля r_1 и l_1 одинаково ослаблены. Поэтому поля r_1 и l_1 при световом равновесии будут одинаково контрастны по отношению к полям r_2 и l_2 (если они равноосвещены (рис. 7в)).

!!!!

**ВО ИЗБЕЖАНИЕ ПОРЧИ ФОТОМЕТРА НЕЛЬЗЯ
РАЗБИРАТЬ ФОТОМЕТРИЧЕСКУЮ ГОЛОВКУ И
ДОТРАГИВАТЬСЯ ДО ПЛАСТИНКИ Р.**

!!!!

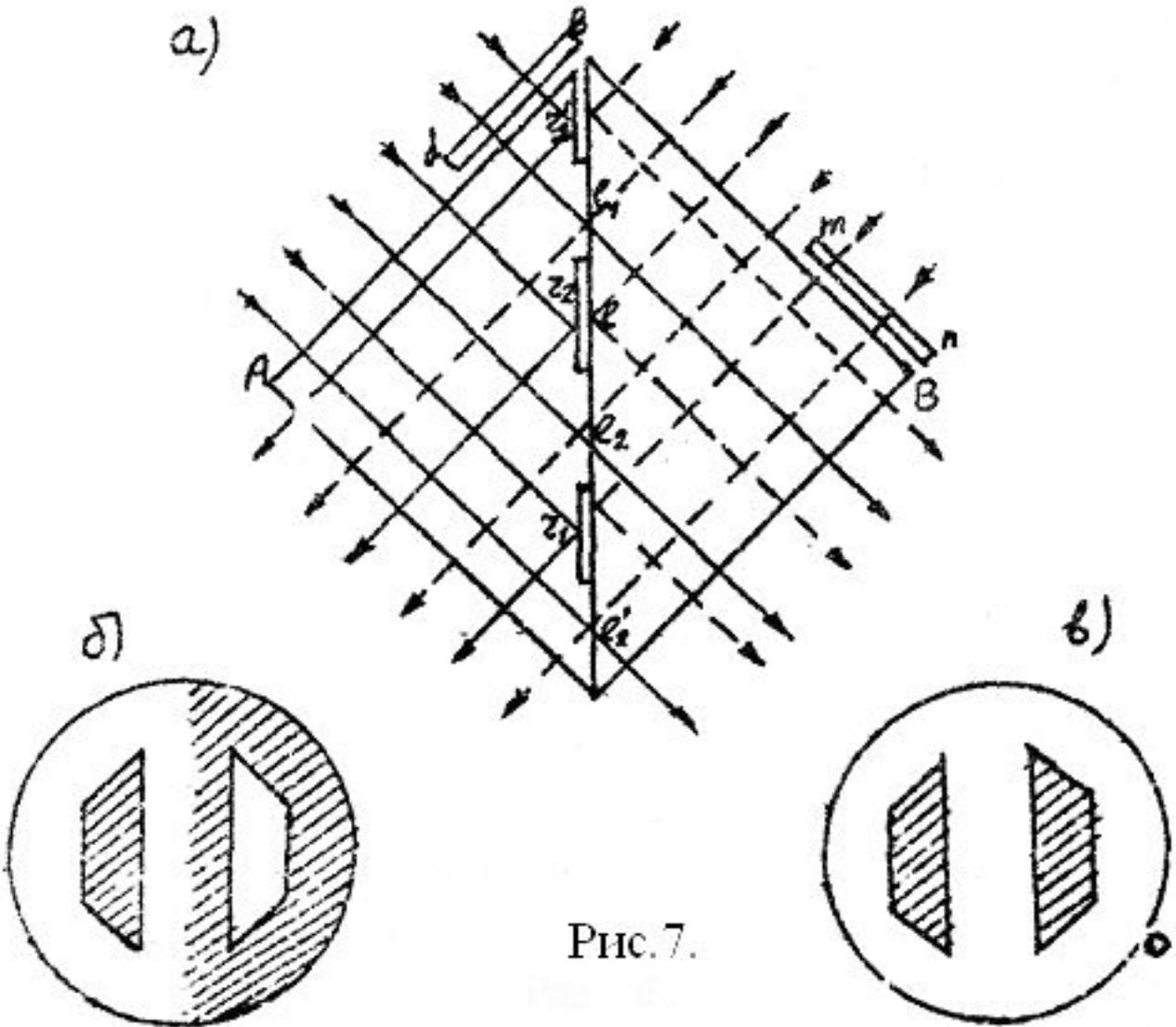


Рис. 7.

Вопросы:

6. Почему пластина Р должна отражать свет диффузно, а не зеркально?
7. Почему обе стороны пластины Р должны быть симметричны и одинаково отражать свет?
8. Почему нельзя дотрагиваться до элементов фотометрической головки (поверхностей пластин и кубика)?
9. Нарушится ли правильность определения силы света, если освещающая пластинка Р будет не перпендикулярна скамье?
10. Покажите на чертеже, какие лучи образуют внутреннее и внешнее световое поле в кубике Люммера - Бродхуна.
11. Объясните ход лучей и вид световых полей в контрастном фотометре при отсутствии равновесия и при световом равновесии.

1.7. Измерение силы света источника.

Первый способ.

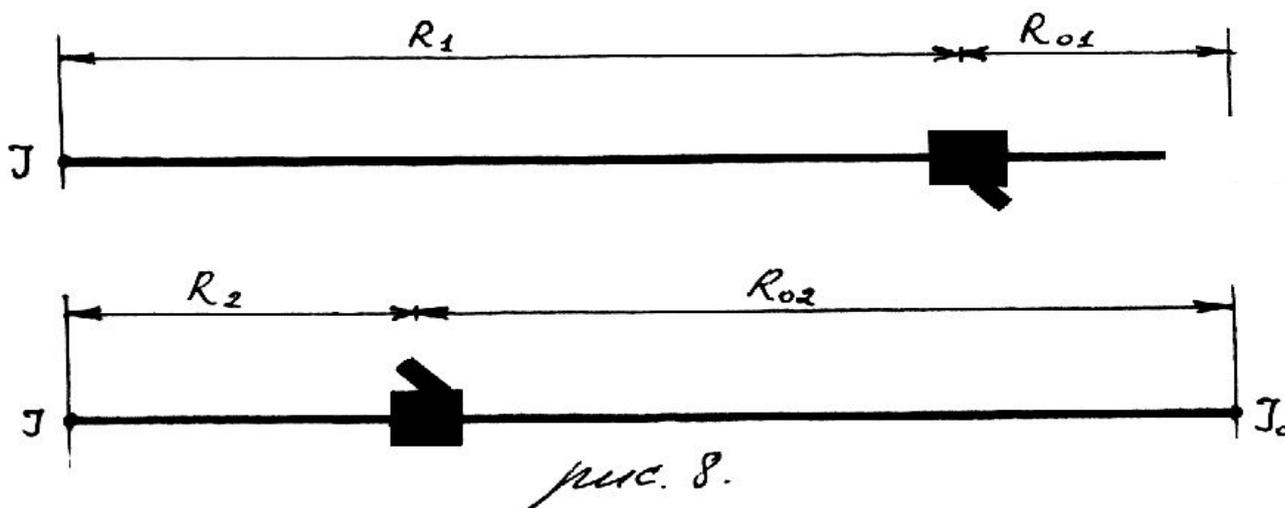
Сравниваемые источники с силой света J и J_0 (известно) устанавливаются на скамье по обе стороны фотометрической головки и неподвижно закрепляются. Светового равновесия добиваются путем перемещения фотометрической головки относительно источников света. Отсчитывают расстояния R и R_0 от источников до приемной пластины. Отношение силы света источников равно отношению квадратов измеренных расстояний:

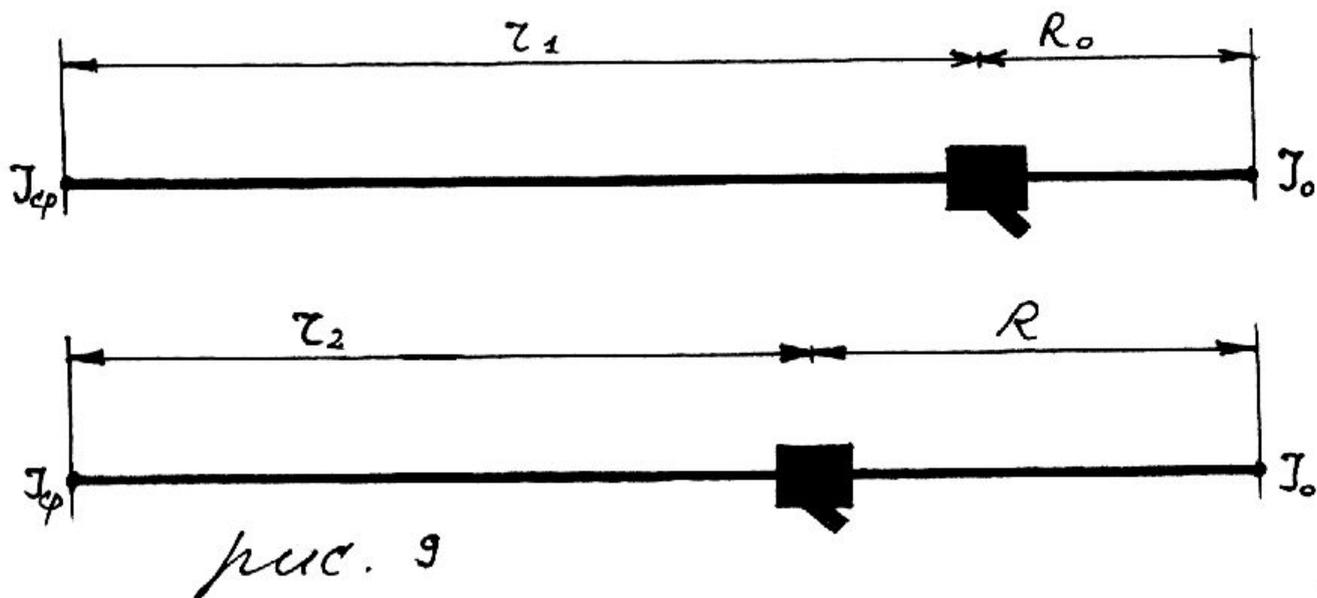
$$\frac{J}{J_0} = \frac{R^2}{R_0^2}. \quad (1)$$

Чтобы исключить ошибку на неодинаковые потери света с обеих сторон пластины, половину измерений производят на скамье при одном положении головки, а другую - с головкой, повернутой на 180° вокруг оси. В этом случае пользуются более сложной формулой:

$$\frac{J}{J_0} = \frac{R_1 R_2}{R_{01} R_{02}},$$

где R_1 и R_{01} - расстояния от ламп до пластины при одном положении головки, а R_2 и R_{02} - при перевернутой головке (рис.8).





ВТОРОЙ СПОСОБ (рис.9).

Сначала один, потом другой сравниваемые источники света J и J_0 устанавливаются по одну сторону фотометрической головки. С другой стороны головки на фотометрической скамье, как при первом, так и при втором источниках света устанавливается одна и та же лампа, называемая лампой сравнения. Сила света лампы сравнения в формулу для вычисления отношения сил света первого и второго источников не входит. При этом способе измерений исключаются ошибки, связанные с несимметричностью фотометрической головки и не требуется никаких поворотов головки или приемной пластины. Если лампа сравнения закреплена на скамье, а первый и второй источники света устанавливаются на одно и то же место на скамье и также при измерениях неподвижно закрепляются, то светового равновесия достигают перемещением по скамье фотометрической головки.

Отношение сил света первого и второго источников подсчитывается по следующей формуле:

$$\frac{J}{J_0} = \frac{R^2 r_1^2}{R_0^2 r_2^2}, \quad (2)$$

где R и R_0 - расстояния от сравниваемых источников света J и J_0 до приемной пластины фотометрической головки; r_1 и r_2 - расстояния от лампы сравнения до приемной пластины головки, когда установлены соответственно первый и второй источники света.

Иногда предпочитают закреплять неподвижно фотометрическую головку и испытуемые источники, а светового равновесия добиваться перемещением лампы сравнения. Тогда вместо формулы (2) следует пользоваться более простой формулой:

$$\frac{J}{J_0} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

1.8 Изучение углового распределения силы света вокруг лампочки накаливания.

Лампочку накаливания ставят так, чтобы указатель на её штативе совпал с 0° круга с делениями. Измеряют, как в предыдущем упражнении, силу света, излучаемого лампочкой в данном её положении, относительно фотометра. Затем, поворачивая лампочку около вертикальной оси каждый раз на $10-15^\circ$, определяют её силу света в новых положениях относительно фотометра.

Получив, таким образом, распределение силы света вокруг лампочки при повороте её относительно фотометра на 360° , вычерчивают кривую распределения силы света в полярных координатах, откладывая по радиусам силу света.

Вопрос:

12. Объясните, почему полученная кривая имеет несимметричный вид.

Задания:

1. Ознакомьтесь с устройством фотометрической скамьи.
2. Отъюстируйте установку, т.е. установите источники света на оси фотометрической головки.
3. Определите силу света лампы накаливания относительно эталонной одним из описанных способов.
4. Постройте кривую углового распределения силы света лампы накаливания.
5. Получите зависимость силы света лампы накаливания от питающего её напряжения: $J(U)$.
6. Подготовьте работу по изучению законов освещенности на серийном школьном фотометре.

Литература:

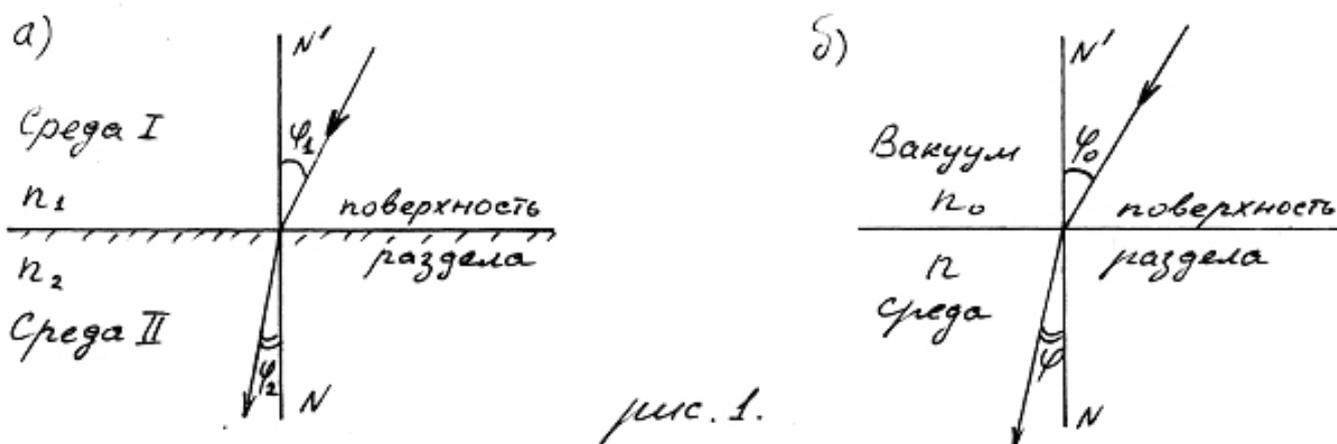
1. Ландсберг Г.С. Оптика. М., 1977. С. 43-61.
2. Бутиков Е.И. Оптика. М., 1986. С. 33-35, С.67-70.
3. Сивухин Б.В. Общий курс физики. ч.4, Оптика. М., 1980, с.140-153.
4. Физический практикум по оптике, Сост. Князев С.И. Часть 3, Шадринск. 1970. с. 27-57.

Преломление света.

Падая на границу раздела двух сред, свет может вернуться в первую среду (отражение света), а может пройти во вторую среду (если она прозрачна). Переходя во вторую среду, свет чаще всего меняет направление распространения, поэтому это явление называется преломлением света. На протяженной плоской границе раздела однородных изотропных прозрачных (непоглощающих) сред установлены следующие законы:

1. Преломленный луч лежит в плоскости, проходящей через падающий луч и нормаль к границе раздела из точки падения луча.
2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина по-

стоянная для данных двух сред:
$$\frac{\sin \varphi_{\text{пад}}}{\sin \varphi_{\text{прел}}} = \text{const} = n_{21}.$$



На рис. 1а:

NN' - нормаль к поверхности раздела;

φ_1 - угол падения (угол в первой среде);

φ_2 - угол преломления (угол во второй среде);

n_{21} - относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

Если первой средой является вакуум (см. рис. 1б), то показатель преломления среды относительно вакуума называется абсолютным показателем преломления среды:

$$n = \frac{\sin \varphi_0}{\sin \varphi} - \text{const для среды.}$$

Абсолютный показатель преломления среды показывает, во сколько раз скорость света в среде меньше скорости света в вакууме c ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с): $n = \frac{c}{g}$.

Т.о., второй закон преломления может быть записан в следующих формулах:

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1}, \text{ где } g_1 \text{ и } g_2 - \text{ скорости света в первой и второй средах. Оче-}$$

видно, что если свет идет из второй среды в первую, то запись закона не изменится (лучи взаимно-обратимы).

Если свет распространяется в среде с плавно меняющимся показателем преломления (неоднородная жидкость, атмосфера и т.п.), то изменение направления распространения света происходит непрерывно. В этом случае принято говорить не о преломлении света, а о рефракции света.

Методы рефрактометрии.

Рефрактометрией (от латинского *refractus* - преломленный и греческого *metres*- измеряю) называется раздел оптической техники, посвященный методам и средствам измерения показателя преломления n твердых, жидких и газообразных сред в различных участках спектра оптического излучения:

Основными методами рефрактометрии являются:

- 1) Методы прямого измерения углов преломления света при прохождении им границы раздела двух сред;
- 2) Методы, основанные на явлении полного отражения света.
- 3) Интерференционные методы.

Для измерения n по углу преломления образцу из исследуемого материала придают форму призмы и определяют n , добиваясь поворотом призмы минимального угла отклонения луча. Точность определения n этим методом $\sim 10^{-5}$, а минимально измеряемые разности n двух веществ $\sim 10^{-7}$.

При использовании явления полного отражения образец исследуемого вещества приводится в оптический контакт с эталонной призмой из материала с высоким и заранее точно известным показателем преломления. Свет может направляться как со стороны образца, так и со стороны призмы. В обоих случаях в определенном и очень узком интервале углов падения пучка лучей на поверхности раздела образца и призмы в поле зрения появится граница, разделяющая темный и светлый участки поля и соответствующая предельному углу падения луча. Точность метода, использующего полное отражение, составляет $\sim 10^{-5}$.

В интерференционных методах разность показателей преломления Δn сравниваемых сред определяют по числу порядков интерференции лучей, прошедших эти среды. Точность этих методов достигает 10^{-7} - 10^{-8} .

Приборы для определения показателя преломления методами рефрактометрии называются рефрактометрами.

Рефрактометрия широко применяется для определения состава и структуры вещества, а также для контроля качества и состава различных продуктов в химической, фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности. Знание градиентов показателя преломления позволяет производить расчет градиентов плотности и концентрации. Методы рефрактометрии используют при проверке однородности твердых образцов и жидкостей, в аэро- и гидродинамических исследованиях. Особую роль играет рефрактометрия в оптической промышленности, т.к. показатель преломления и дисперсия оптических материалов являются их важнейшими характеристиками.

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ СТЕКЛЯННОЙ ПРИЗМЫ

Оборудование: Стеклянная призма, гониометр, ртутная лампа.

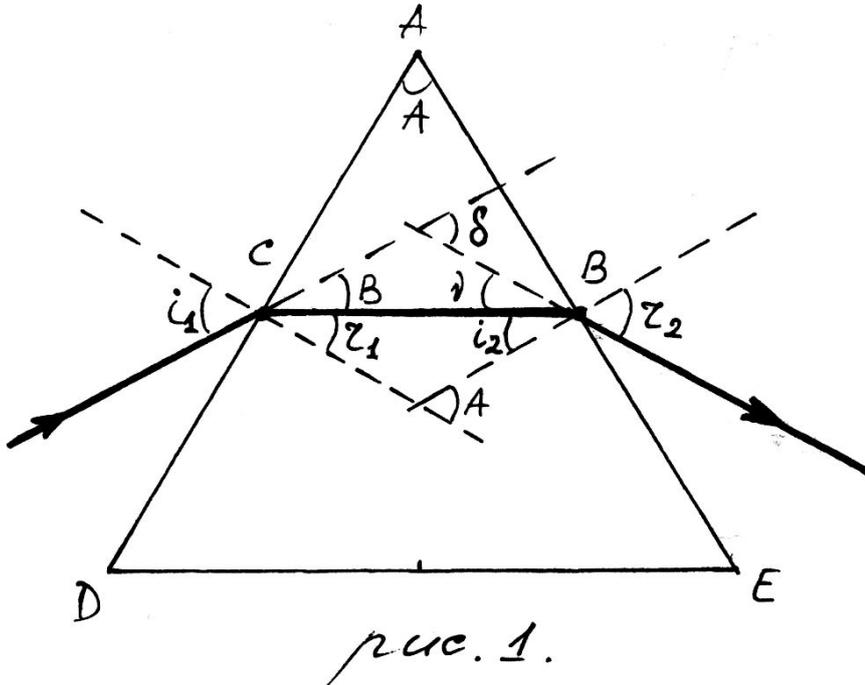
Описание целей работы

№	Конкретная цель	Критерий достижения цели
1. Изучение теории.		
1	Явление преломления света.	Без ошибки объяснить термины: преломление света, угол падения, угол преломления, показатель преломления, абсолютный показатель преломления и применить закон преломления к заданным условиям.
2	Ход лучей через призму	Построить ход луча через призму и ответить на вопросы 1-6.
3	Явление дисперсии света	Указать различие между терминами: дисперсия света и угловая дисперсия прибора.
4	Распространение света в диспергирующей среде.	Указать различие между понятиями фазовая и групповая скорость.
Практические навыки		
5	Принципиальная схема гониометра.	По выполненному рисунку указать основные части гониометра, их назначение, устройство и подготовку к работе.
6	Определение угла минимального отклонения.	Выполнить необходимые действия для указанной преподавателем линии.
7	Снятие отсчета по лимбу и нониусу.	Снять показание прибора, указанное преподавателем

1. Изучение теории.

1.1. Ход луча через трехгранную призму.

Пусть монохроматический луч падает на грань АД призмы (рис.1) под углом i_1 . Преломившись под углом r_1 , он идет внутри призмы по направлению СВ и падает на грань АЕ под углом i_2 . Преломившись в точке В, он выходит из призмы под углом r_2 . Двугранный угол А называется преломляющим, а грань ДЕ - основанием призмы. Угол δ между первоначальным направлением луча и направлением его после выхода из призмы называется углом отклонения. Из рис.1 имеем:



$\delta = \beta + \nu$; $\beta = i_1 - r_1$; $\nu = r_2 - i_2$.

Следовательно:

$$\delta = i_1 - r_1 + r_2 - i_2 = i_1 + r_2 - (r_1 + i_2).$$

Но $r_1 + i_2 = A$. Значит, $\delta = i_1 + r_2 - A$.

Известно, что:

$$\sin i_1 = n \sin r_1;$$

$$\sin r_2 = n \sin i_2 = n \sin(A - r_1);$$

Отсюда:

$$i_1 = \arcsin(n \sin r_1);$$

$$r_2 = \arcsin[n \sin(A - r_1)].$$

Получаем: $\delta = \arcsin(n \sin r_1) + \arcsin[n \sin(A - r_1)] - A$.

Наиболее просто показатель преломления призмы определяется по углу наименьшего отклонения δ_0 . Этот угол находится по экстремуму функции δ :

$$\frac{d\delta}{dr_1} = \frac{n \cos r_1}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(A - r_1)}} = 0.$$

Этому уравнению удовлетворяет значение $r_1 = A/2$. Тогда

$$i_2 = A - r_1 = A/2 = r_1.$$

Итак, угол отклонения минимален, если $r_1 = i_2 = A/2$, т.е. луч в призме идет перпендикулярно биссектрисе угла А. При этом:

$$\beta = \nu; \quad \delta_0 = 2\beta \text{ и угол падения:}$$

$$i_1 = \beta + r_1 = \frac{\delta_0}{2} + \frac{A}{2} = \frac{A + \delta_0}{2}.$$

Показатель преломления призмы в этом случае вычисляется через угол наименьшего отклонения:

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin r_1} = \frac{\sin\left(\frac{A + \delta_0}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)}. \quad (1)$$

Таким образом, для определения показателя преломления призмы необходимо измерить преломляющий угол призмы и угол наименьшего отклонения данного луча.

Вопросы:

1. Покажите ход через призму, показатель преломления которой больше показателя преломления окружающей среды. Укажите углы падения и преломления на первой и второй гранях.
2. Сделайте то же самое для призмы с показателем преломления меньшим показателя преломления окружающей среды.
3. Укажите на рисунках преломляющий угол призмы и угол отклонения луча.
4. Напишите закон преломления на каждой грани.
5. В каком случае луч, проходящий через призму, испытывает наименьшее отклонение?
6. Напишите соотношение, по которому можно определить показатель преломления материала, из которого сделана призма.

1.2. Явление дисперсии света.

Показатель преломления зависит от свойств вещества и от длины волны света. Зависимость показателя преломления от длины волны $n(\lambda)$ (или частоты $n(\omega)$) света называют дисперсией света. Т.к. показатель преломления вещества представляет собой отношение скорости света в вакууме к скорости света в данном веществе:

$n = \frac{c}{g}$, то дисперсия является также зависимостью скорости света в данной среде от длины волны $g(\lambda)$ или частоты $g(\omega)$.

Наличие дисперсии позволяет в эксперименте "рассортировать" сложный свет по монохроматическим ("моно" - один, "хром" - цвет) компонентам. Например, белый свет, падая под углом на грань призмы (рис.2), разлагается в спектр, т.к. различным значениям λ соответствуют различные направления преломленного излучения. Это позволяет использовать призму в качестве спектрального прибора.

Одна из основных характеристик спектрального прибора – угловая дисперсия:

$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda}$, где $d\varphi$ - угол расхождения между спектральными линиями с длинами

волн λ и $\lambda + d\lambda$. Угловая дисперсия прибора зависит от дисперсии вещества $\frac{dn}{d\lambda}$.

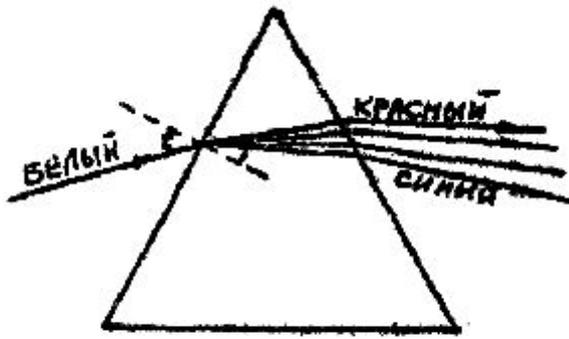


Рис. 2.

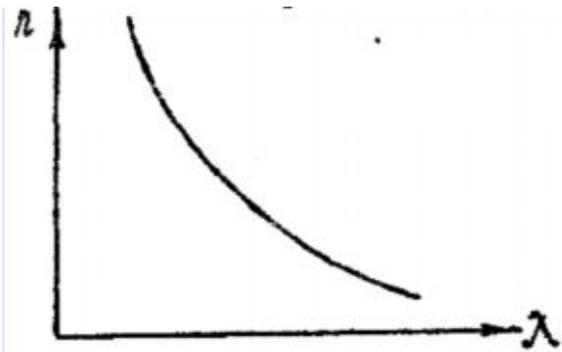


Рис. 3

Для всех бесцветных прозрачных веществ в видимой области $\frac{dn}{d\lambda} < 0$, т.к. с уменьшением длины волны λ показатель преломления n увеличивается (нормальная дисперсия), поэтому синие лучи ($\lambda \approx 400$ нм) отклоняются сильнее, чем красные ($\lambda \approx 760$ нм) (см. рис. 2,3).

Для трехгранной призмы угловая дисперсия вблизи угла наименьшего отклонения равна:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{2 \sin\left(\frac{A}{2}\right)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2\left(\frac{A}{2}\right)}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (2)$$

1.3. Распространение света в диспергирующей среде.

В вакууме все электромагнитные волны идут с одинаковой скоростью (дисперсии нет). В среде с дисперсией скорость различных длин волн будет различна. Для идеальной монохроматической волны (бесконечной, во времени и пространстве) понятие скорости совпадает со скоростью распространения фазы (\mathcal{V} - фазовая скорость). Фазовая скорость входит в формулу закона преломления.

Идеальная монохроматическая волна непригодна для передачи сигнала. Для передачи сигнала на волне нужно сделать отметку, например, оборвав ее. В волновой оптике принято считать, что световая волна испускается излучающим атомом в виде обрывков волн – «цугов». В этом случае волна перестает быть строго монохроматической и данный цуг можно представить как результат наложения очень большого числа монохроматических волн с близкими, но разными частотами. Такую систему называют также группой волн или волновым пакетом. Если фазовые скорости всех частот одинаковы (в среде нет дисперсии), то вся совокупность волн распространяется с той же скоростью, и форма пакета не меняется. В среде с дисперсией скорость отдельных частот различна, и форма пакета размывается. Под его скоростью обычно понимают скорость и перемещение центра пакета, т.е. точки с максимальной амплитудой. Эту скорость называют групповой скоростью.

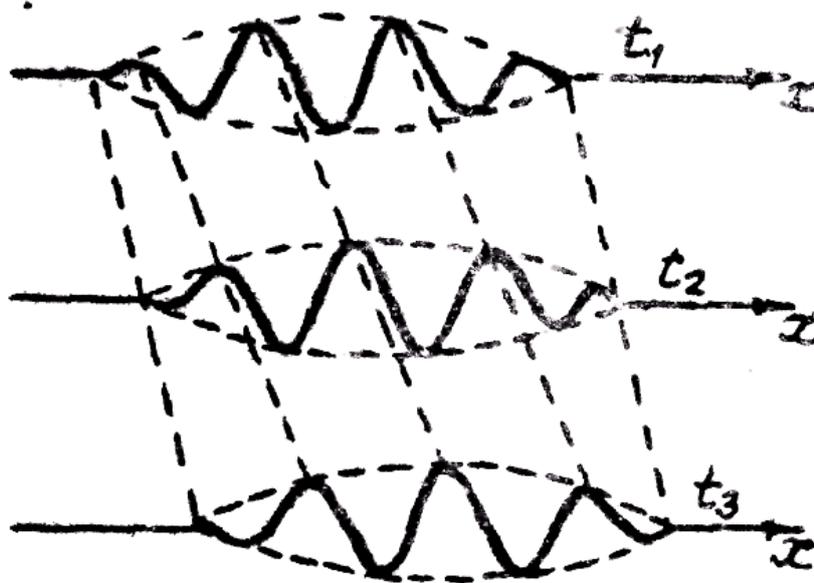


Рис.4.

На рис.4 показаны "фотографии" волнового пакета для трех последовательных моментов времени. Наклон пунктирных прямых, соединяющих точки одинаковой фазы, характеризует разовую скорость \mathcal{G} ; наклон прямых, соединяющих точки начала и конца пакета характеризуют групповую скорость u . На рисунке $u < \mathcal{G}$, поэтому внутри пакета движение "горбов" и „впадин” обгоняет движение пакета в целом, причем в левом конце пакета все время возникают новые "горбы", которые исчезают с правого конца. Такое положение имеет место при нормальной дисперсии. Релей показал ([2], стр. 129-136, [3], стр. 54-63), что

$$u = \mathcal{G} - \lambda \frac{d\mathcal{G}}{d\lambda}. \quad (3)$$

Перенос энергии волны (скорость сигнала) происходит с групповой скоростью U . Групповая скорость имеет ограничение: $u \leq c$, где c - скорость света в вакууме. Фазовая скорость ограничений не имеет.

2. Выполнение работы.

2.1. Устройство гониометра.

Измерение углов отклонения в работе производится с помощью гониометра, принципиальная схема которого изображена на рис.5. Его основные части: коллиматор К, призма П и зрительная труба ЗТ.

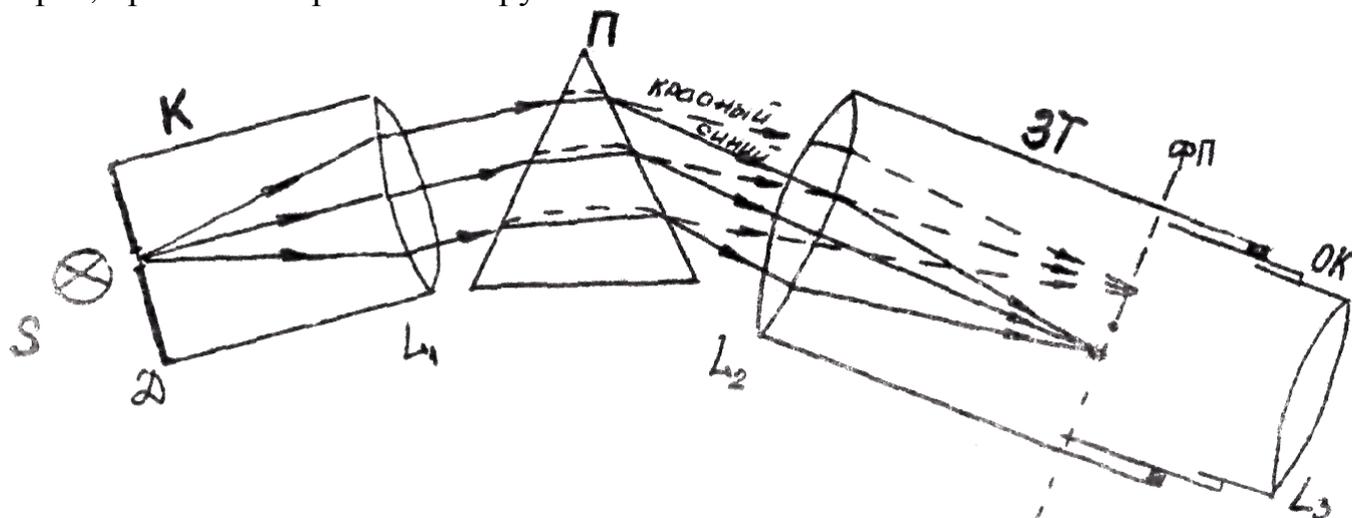


Рис.5.

Коллиматор предназначен для получения параллельных лучей. Свет от лампы S через узкую щель Д попадает в коллиматор и выходит через линзу L_1 параллельным пучком.

Вопросы:

7. Каково должно быть расстояние между щелью Д и линзой L_1 ?
8. Почему лучи должны падать на призму параллельным пучком?

Призма разводит лучи разных цветов по различным направлениям. Столик, на котором укреплена призма, свободно вращается вокруг оси. Отсчет углов идет от коллиматора справа налево.

Линза L_2 зрительной трубы собирает лучи одного цвета в одной из точек своей фокальной плоскости ФП, другого цвета - в другой точке. Т.о., в фокальной плоскости объектива зрительной трубы образуется ряд цветных изображений щели (спектр), который мы можем рассматривать с помощью окуляра ОК.

2.2. Подготовка к работе.

1. Установите ширину щели Д коллиматора на глаз около 0,5 мм.
2. Перед щелью коллиматора установите ртутную лампу с линейчатым спектром испускания и включите ее.

!!! ВНИМАНИЕ !!!

В работе используется ртутная лампа сверхвысокого давления. Внутри лампы, наполненной аргоном, находится некоторое количество ртути, которая во время работы полностью испаряется и дает нужное для лампы давление в 10-15 атм. Аргон введен в лампу для начального зажигания разряда.

Ртутная лампа является мощным источником видимого и ультрафиолетового излучения.

Запрещается включать лампу без футляра и защитного стекла. Для включения лампы необходимо последовательно нажать на пульте кнопки "сеть", "лампа ДРШ" и "пуск". Повторное включение лампы возможно только после того, как она охладится (через ~10 мин.).

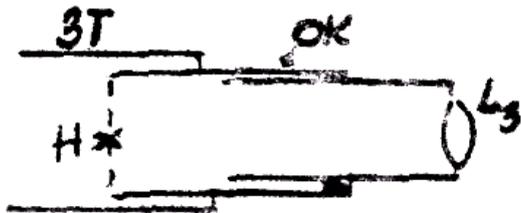


Рис.6.

3. Перемещая линзу L_3 окуляра (рис.6) добейтесь резкого изображения нити Н (окуляр можно вынуть из трубы, настроить и вставить обратно). В дальнейшей работе не меняйте положения линзы L_3 , а все перемещения окуляра производите корпусом ОК.

4. В работе для измерения углов совмещают нить окуляра с видимым изображением щели и снимают отсчет по лимбу с нониусом. При этом двигая окуляр каждый раз добиваются четкого изображения щели.

2.3. Определение преломляющего угла призмы.

1. Установите столик с призмой так, чтобы лучи падали на обе грани преломляющего угла А призмы симметрично: $\alpha \approx \beta$ (рис.7).

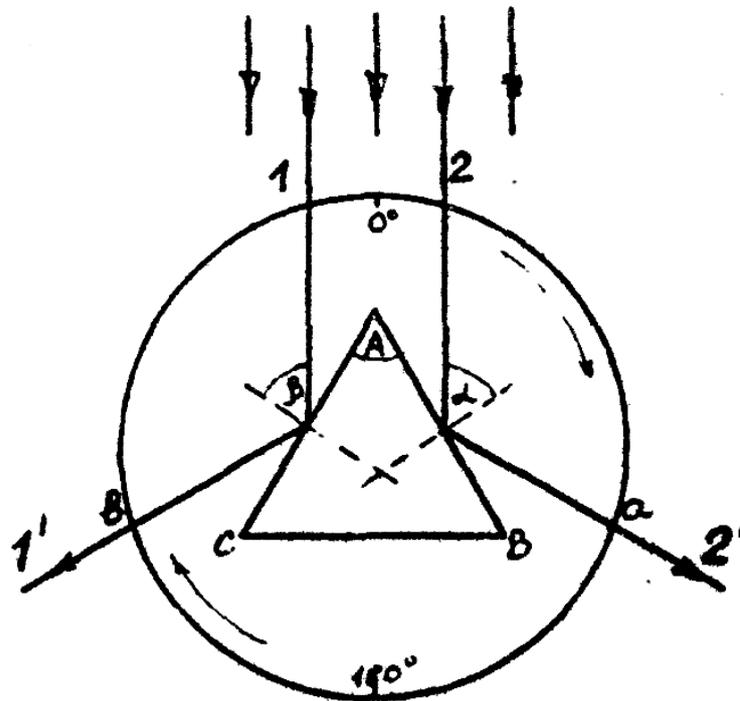


Рис.7.

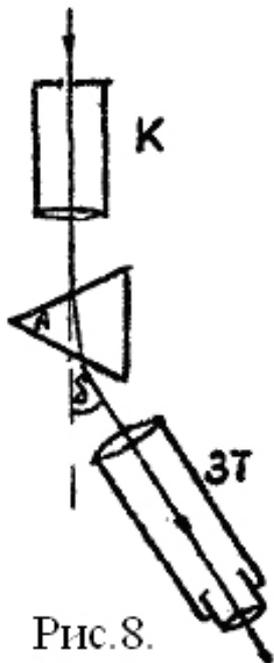
2. Установите зрительную трубу в положение $2'$ и найдите изображение щели, отраженное от грани АВ (белая линия!). Снимите отсчет a по лимбу и нониусу.
3. Поверните зрительную трубу в аналогичное положение $1'$ и снимите отсчет b .

4. Как видно из рис.7, $A = \frac{b-a}{2}$.

5. Для одного и того же угла A сделайте несколько измерений и усредните.

2.4. Определение угла наименьшего отклонения.

1. Поверните столик с призмой так, чтобы биссектриса ее преломляющего угла A (измеренного, ранее) была перпендикулярна оси коллиматора (см. рис.8), а основание призмы находилось справа от вас. Поворачивайте зрительную трубу вправо до тех пор, пока в поле зрения не появятся линии спектра. Если спектр не наблюдается, то немного разверните призму так, чтобы вершина A удалялась от коллиматора и вновь поищите спектр, двигая зрительную трубу.



2. Наведите зрительную трубу на нужную вам линию (например, желтую). Не меняя положение трубы, слегка вращайте столик с призмой так, чтобы угол отклонения вашей линии уменьшался. При вращении призмы в этом направлении линия вскоре остановится и повернет назад. В момент остановки линии положение призмы соответствует установке на угол наименьшего отклонения для данного луча.

3. Совместите нить окуляра с линией. Вращая столик с призмой, проверьте, соответствует ли установка углу минимального отклонения. В случае необходимости исправьте установку зрительной трубы. Снимите отсчет φ_1 по лимбу с нониусом.

4. Поверните столик с призмой в симметричное положение и снимите отсчет φ_2 (рис.9). Угол наименьшего отклонения:

$$\delta_0 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}$$

5. Вычислите показатель преломления призмы для данной ширины волны по

формуле (1):

$$n = \frac{\sin\left(\frac{A + \delta_0}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)}$$

2.5. Задания.

1. Определите преломляющий угол призмы.
2. Определите показатели преломления для 5-6 линий видимого спектра ртути.
3. Постройте график зависимости $n(\lambda)$. Значения длин волн ртутного спектра возьмите из таблицы. По оси абсцисс откладывайте длину волны (400 ÷ 800 нм), а по оси ординат – (n-1).
4. По графику определите дисперсию вещества призмы $\frac{dn}{d\lambda}$ (для указанной области длин волн).
5. По формуле $R = \nu \frac{dn}{d\lambda}$ оцените разрешающую способность R призмы, ν - основание призмы. Дайте определение разрешающей способности.
6. Найдите угловую дисперсию прибора $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ и сравните с вычисленной по формуле (2) (для указанной области длин волн).
7. Для одной из линий по формуле (3) вычислите, на сколько % отличается групповая скорость от фазовой.

Лабораторная работа № 4.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА АББЕ.

Оборудование: рефрактометр УРЛ, набор жидкостей и растворов различной концентрации, пипетка.

Описание целей работы.

№	Конкретная цель	Критерий достижения цели
1	Изучение явления полного отражения света.	Студент без ошибки: а) формулирует условия наблюдения явления; б) формулирует определение предельного угла; в) вычисляет значение предельного угла для указанной преподавателем пары веществ.
2	Изучение принципа работы прибора.	Студент может начертить чертёж и объяснить образование границы на световом поле и принцип измерения показателя преломления.
3	Практические навыки.	Студент должен самостоятельно определять: а) показатель преломления прозрачной жидкости; б) показатель преломления твердого вещества.

1. Изучение теории.

1.1 Явление полного отражения.

На рисунке 1 изображена граница раздела двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 , причем $n_2 > n_1$. Среда с большим показателем преломления называется оптически более плотной, с меньшим – оптически менее плотной. Луч может идти в любом направлении. На рисунке 1а луч света проходит из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную. В этом случае угол преломления (угол φ_2 в среде 2) всегда меньше угла падения φ_1 , т.е. при любом угле падения света на поверхность раздела он проникает во вторую среду. Наибольшее значение угла падения равно 90° , соответствующий ему угол преломления φ_0 будет наибольшим для данной пары сред и называется предельным. Очевидно, что:

$$n_{21} = \frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \varphi_0} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ откуда: } \sin \varphi_0 = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{n_{21}}. \quad (1)$$

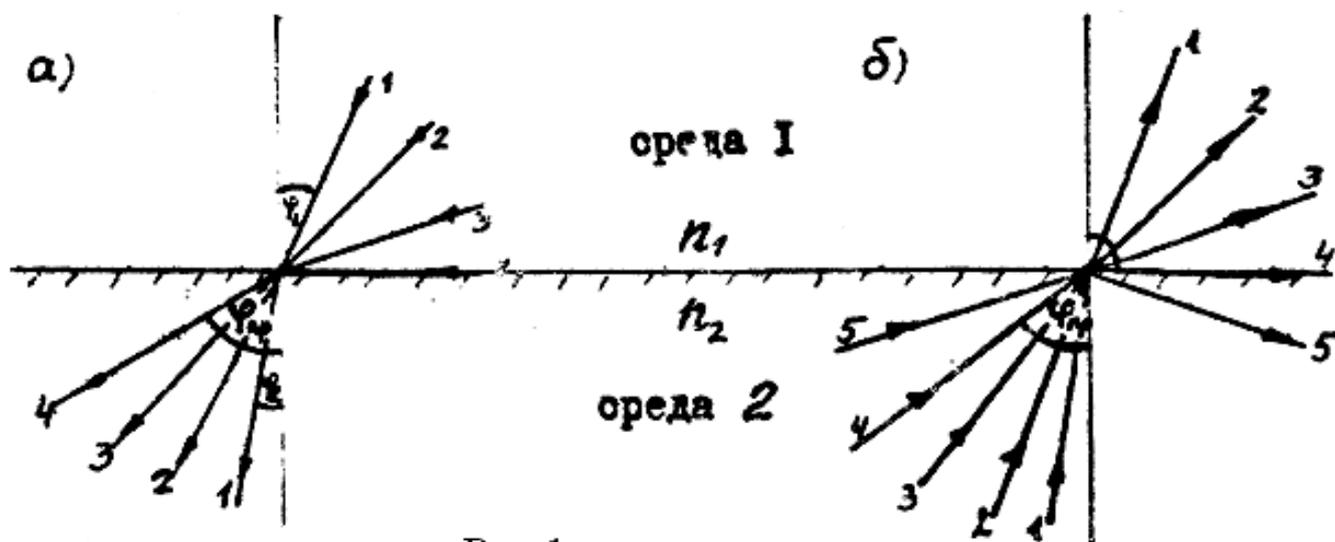


Рис.1.

Если свет идет в обратном направлении, т.е. из среды оптически более плотной в менее плотную (рис.1б), то угол преломления (φ_1) будет больше угла падения (φ_2), т.е. угол преломления растет быстрее угла падения и при некотором значении угла падения он достигает значения 90° . При дальнейшем увеличении угла падения преломление не происходит и весь падающий свет отражается от границы раздела (полное отражение). Преломление отсутствует. Т.о. явление полного отражения света наблюдается при условиях:

- а) свет должен идти из среды оптически более плотной в менее плотную;
- б) угол падения должен превышать некоторый предельный угол.

Согласно (1) величина предельного угла зависит от показателей преломления двух сред, что используется для их определения.

1.2. Принцип работы рефрактометра Аббе.

При использовании для измерения показателя преломления явления полного отражения образец измеряемого материала приводится в оптический контакт с эталонной призмой из материала с высоким и заранее точно известным показателем преломления. Свет может направляться как со стороны образца, так и со стороны призмы. В обоих случаях в поле зрения наблюдатель увидит границу, разделяющую темный и светлый участки поля и соответствующую предельному углу.

Основной частью рефрактометра, принцип работы которого предложил немецкий ученый Аббе, являются две прямоугольные призмы I и II, сделанные из одного сорта стекла с показателем преломления $N > 1,70$ (рис.2а). Призмы соприкасаются гипотенузными гранями, между которыми остается зазор около 0,1 мм. Между призмами помещают каплю жидкости, показатель преломления которой требуется определить. Луч света от источника 3 направляется на боковую грань верхней призмы (рис.2а) и, преломившись, попадает на гипотенузную грань АВ. Поверх-

ность АВ матовая и поэтому свет рассеивается на ней и, пройдя через исследуемую жидкость падает на грань СД нижней призмы под углами от 0° до 90° . Если показатель преломления жидкости меньше показателя преломления стекла, то лучи света входят в призму II в пределах от 0 до φ_0 . Пространство внутри этого угла будет освещенным, а вне его - темным. Таким образом, поле зрения, видимое в зрительную трубу, разделено на две части: темную и светлую. Положение границы раздела света и тени определяется предельным углом преломления, зависящим от показателя преломления исследуемой жидкости. Измерив угол β , под которым выходят лучи из призмы II и её преломляющий угол D , можно определить n жидкости по формуле:

$$n = \sin D \sqrt{N^2 - \sin^2 \beta} - \cos D \sin \beta. \quad (2)$$

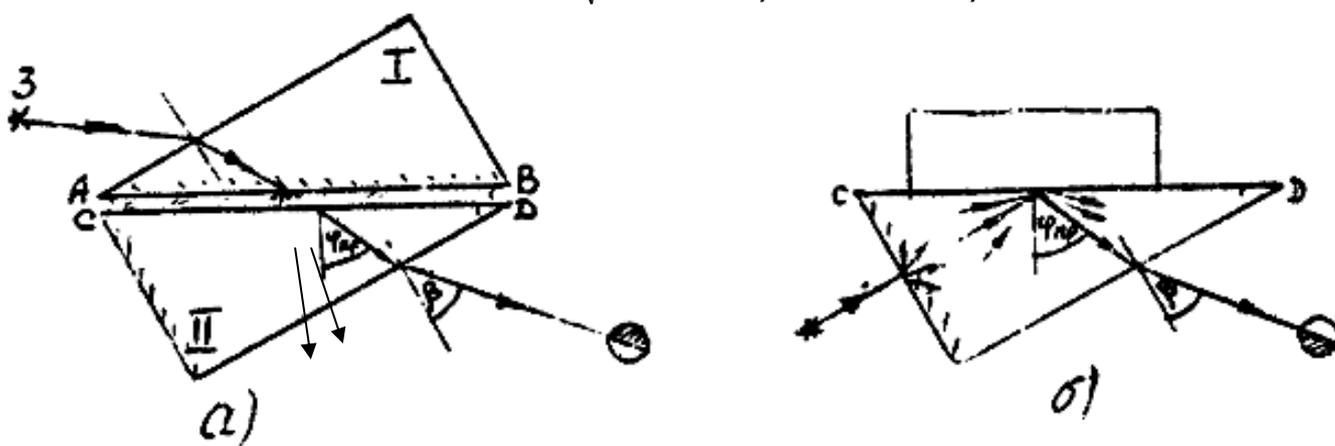


Рис. 2.

На практике формула (2) используется для составления таблиц зависимости $n(\beta)$ или градуирования шкалы рефрактометра.

Если жидкость (исследуемая) имеет большой показатель поглощения (мутная, окрашенная жидкость), то во избежание потерь энергии при прохождении света через жидкость измерения проводят в отраженном свете. Ход лучей в рефрактометре в этом случае показан на рисунке 2б. Луч света от источника проходит через матовую боковую грань СМ нижней призмы. При этом свет рассеивается и падает на гипотенузную грань СД, соприкасающуюся с исследуемой жидкостью, под всевозможными углами от 0 до 90° . Если жидкость оптически менее плотная, чем стекло, из которого изготовлена призма, то лучи, падающие под углами, большими φ_0 , будут испытывать полное отражение и выходить через боковую грань нижней призмы в зрительную трубу. Световое поле, также как и в первом случае, окажется разделенным на светлую и темную части. Положение границы раздела в данном случае определяется предельным углом полного отражения, также зависящим от показателя преломления исследуемой жидкости. Таким же образом измеряется показатель преломления твердых тел.

С помощью прибора можно исследовать вещества, показатель преломления которых меньше показателя преломления стекла измерительных призм.

Вопросы:

1. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
2. Какой угол называется предельным углом?

3. В чем заключается явление полного отражения?
4. Найдите предельный угол и укажите направление луча, испытывающего полное отражение для следующих пар: вода-стекло, воздух-стекло; воздух-вода; стекло-масло; спирт-вода.
5. Начертите ход лучей в рефрактометре в проходящем и отраженном свете.
6. Как изменится работа прибора, если призмы его будут сделаны из стекла с меньшим показателем преломления? С разными показателями преломления? Показатель преломления призмы $N = 1,57$. Определите границы измерения рефрактометра.
7. Почему показатель преломления исследуемого вещества должен быть меньше показателя преломления N призмы? Что будет наблюдаться в противном случае?
8. Назовите несколько веществ, показатель преломления которых нельзя измерить данным рефрактометром (пользуясь справочником).

1.3. Рефрактометрические исследования структуры веществ.

Показатели преломления жидких и твердых тел могут измеряться с большой точностью. При данной температуре и для данной длины волны они являются важнейшими постоянными, характеризующими вещество. Измерение показателей преломления может быть использовано для исследования веществ. Обычно измерения проводятся для D - линии натрия ($\lambda = 589,3$ нм).

В основе рефрактометрического метода исследования лежит так называемая формула Лоренц - Лорентца (см. напр., [1]), связывающая показатель преломления n изотропного вещества с числом молекул N_0 в единице объема и поляризуемостью α молекул вещества:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4}{3} \pi N_0 \alpha . \quad (3)$$

Формула (3) позволяет находить α по измерениям показателя преломления вещества. Из нее следует, что для данного химического вещества (и для света с заданной длиной волны) выполняется соотношение:

$$r = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = const , \quad (4)$$

где ρ - плотность вещества, пропорциональная концентрации молекул N_0 . Величина r называется удельной рефракцией.

Таким образом, из формулы Лоренц - Лорентца следует, что удельная рефракция вещества не должна зависеть от плотности. Хотя вывод формулы Лоренц - Лорентца опирается на ряд не вполне оправданных допущений, формула (4) на опыте обычно хорошо выполняется. Нередко удельная рефракция остается практически постоянной даже при изменении агрегатного состояния вещества (например при замерзании воды).

Опыт показывает также, что удельную рефракцию r смеси веществ можно вычислить, если известны рефракции r_1, r_2, \dots , её отдельных компонентов и их процентное содержание c_1, c_2, \dots в смеси:

$$r = \frac{c_1}{100} r_1 + \frac{c_2}{100} r_2 + \dots \quad (5)$$

Это означает, что оптическое поведение молекул каждого компонента практи-

чески не зависит от присутствия других компонентов.

Существует эмпирическое правило, согласно которому рефракцию сложного химического соединения можно вычислить, складывая рефракции составляющих его элементов. Для каждого элемента удобно ввести понятие атомной рефракции A , представляющей произведение удельной рефракции r данного элемента на его атомную массу A :

$$A = A \cdot r = \frac{A}{\rho} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}. \quad (6)$$

Аналогично вводится молекулярная рефракция химического соединения R :

$$R = M \cdot r = \frac{M}{\rho} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4}{3} \pi \cdot N_A \cdot \alpha. \quad (7)$$

Здесь M - молекулярная масса, N_A - постоянная Авогадро.

Опыт показывает, что во многих случаях молекулярная рефракция обладает свойством аддитивности:

$$R = q_1 A_1 r_1 + q_2 A_2 r_2 + \dots = q_1 A_1 + q_2 A_2 + \dots \quad (8)$$

где q_1, q_2, \dots - числа атомов элементов, входящих в состав молекулы. Аддитивность молекулярной рефракции означает, что взаимодействие отдельных атомов с полем световой волны в первом приближении не зависит от других атомов, входящих в состав той же молекулы. Нарушение аддитивности позволяет судить о взаимном влиянии атомов друг на друга и, следовательно, делать заключение о строении молекул.

Если на опыте измерить показатели преломления 3-х соединений, например, воды H_2O , глицерина $C_3H_8O_3$, этилового спирта C_2H_6O , то, используя аддитивность молекулярной рефракции, можно вычислить показатель преломления любого другого соединения из углерода, водорода, кислорода. Для этого нужно сначала вычислить по формуле (7) молекулярные рефракции воды, глицерина и этилового спирта, а затем рассчитать атомные рефракции A_C, A_H, A_O , используя соотношения:

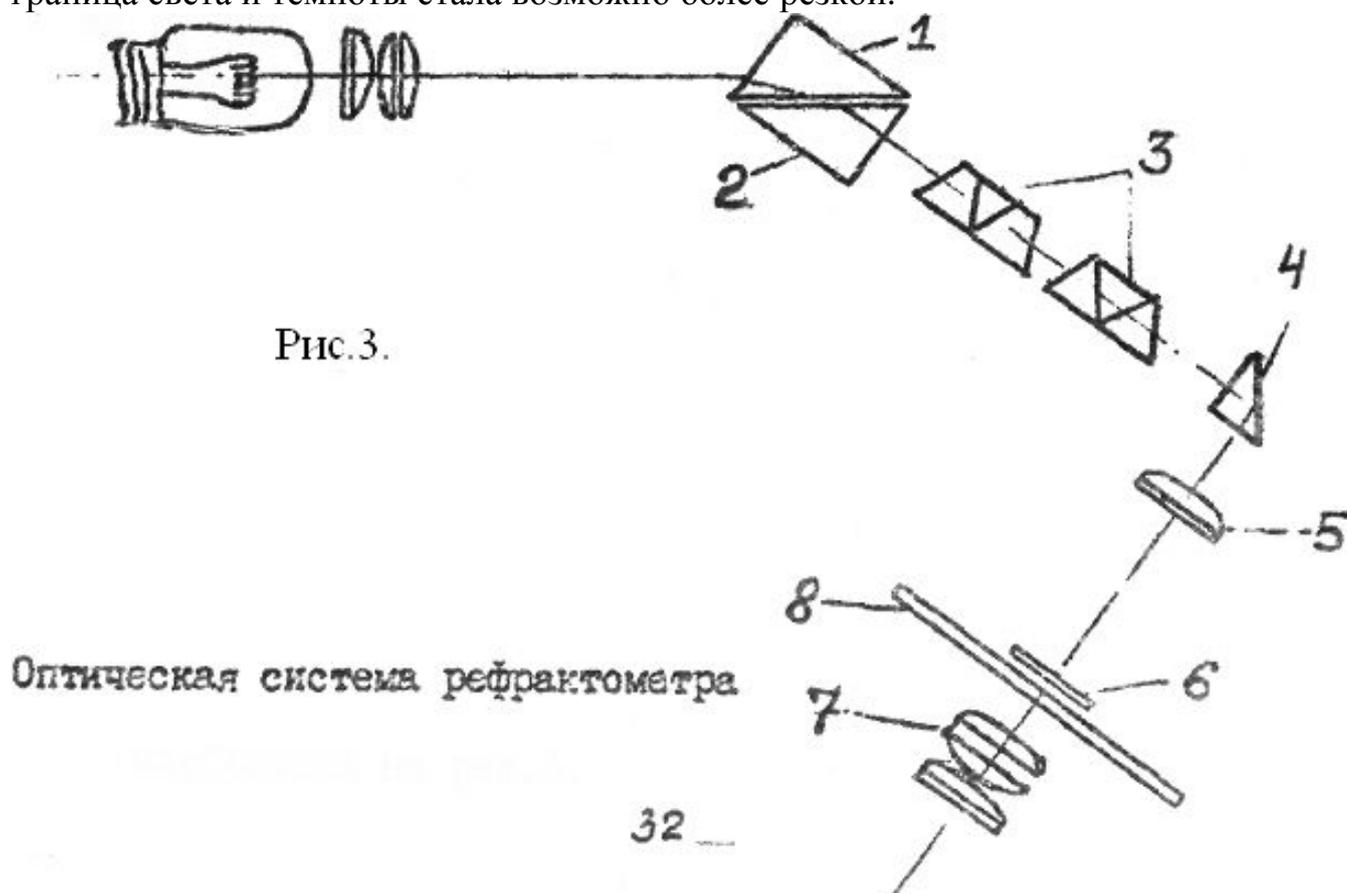
$$\begin{aligned} R_{H_2O} &= 2A_H + A_O, \\ R_{C_3H_8O_3} &= 3A_C + 6A_H + 3A_O, \\ R_{C_2H_6O} &= 2A_C + 6A_H + A_O. \end{aligned} \quad (9)$$

По найденным значениям атомных рефракций A_C, A_H и A_O можно найти молекулярную рефракцию этилового спирта и определить ожидаемую величину его показателя преломления. Аналогично можно рассчитать показатели преломления других соединений из углерода, кислорода и водорода.

2. Выполнение работы.

2.1. Оптическая схема прибора.

В рефрактометре используется источник белого света. Вследствие дисперсии, при прохождении светом призм 1 и 2 граница света и тени оказывается окрашенной. Во избежание этого перед объективом зрительной трубы помещают компенсатор 3. Он состоит из двух одинаковых призм, каждая из которых склеена из трех призм, обладающих различным показателем преломления. Призмы подбирают так, чтобы монохроматический луч с длиной волны $\lambda = 589,3$ нм (длина волны желтой линии натрия) не испытывал после прохождения компенсатора отклонения. Лучи с другими длинами волн отклоняются призмами в различных направлениях. Перемещая призмы компенсатора с помощью специальной рукоятки, добиваются того, чтобы граница света и темноты стала возможно более резкой.



Лучи света, пройдя призмы 1, 2 и компенсатор 3, попадают на объектив зрительной трубы. Изображение границы раздела свет - тень рассматривается в окуляр 7 зрительной трубы. Одновременно в окуляр рассматривается шкала 8. На шкале рефрактометра сразу нанесены значения показателя преломления.

Оптическая система рефрактометра содержит также поворотную призму 4. Она позволяет расположить ось зрительной трубы перпендикулярно призмам 1 и 2, что делает наблюдение более удобным.

В общей фокальной плоскости объектива и окуляра зрительной трубы помещают стеклянную пластинку 6, на которую нанесена визирная линия или крест, образованный тонкими линиями. Перемещением зрительной трубы добиваются совпадения визирной линии с границей свет-тень и по шкале определяют показатель преломления исследуемой жидкости.

На данном приборе могут быть исследованы вещества с показателями преломления от 1,2 до 1,7.

2.2. Конструкция прибора.

Прибор состоит из двух основных, частей: верхней – корпуса и нижней - основания. К корпусу прибора крепятся камеры: верхняя и нижняя. Нижняя камера, заключающая в себе измерительную призму, жестко закреплена на корпусе, верхняя камера с осветительной призмой соединена шарниром с нижней и может поворачиваться относительно её. Окна камер закрываются пробкой.

На штупере нижней камеры неподвижно укреплен осветитель. На передней стенке прибора находится шкала, рукоятка с окуляром для наблюдения границы светотени и совмещения её с перекрестием сетки, лимб дисперсии для устранения окрашенности наблюдаемой границы. Глядя в окуляр наблюдатель видит две шкалы. Верхняя из них является шкалой показателей преломлений. Она рассчитана на основании формулы (2). Нижняя шкала показывает процент содержания сухого вещества в растворе и в нашей работе не используется. Соответствие значений шкалы показателей преломления истинным его значениям проверяется по жидкости с известным показателем преломления.

Внутри основания рефрактометра расположен понижающий трансформатор, предохранитель и весь электрический монтаж. Осветитель включается переключателем, расположенным на передней стенке основания.

2.3. Порядок выполнения работы.

1. После внешнего осмотра по разрешению преподавателя включить рефрактометр в сеть (220 В).
2. Проверить установку шкалы рефрактометра (нуль-пункт) по дистиллированной воде. При 20°C для дистиллированной воды граница светотени должна находиться на делении 1,33299 шкалы.

Для проверки и установки нуль - пункта необходимо:

- снять пробку с окна верхней камеры, окно нижней камеры должно быть закрыто;
- открыть верхнюю камеру и промыть дистиллированной водой или спиртом поверхности измерительной или осветительной призм, и насухо вытереть чистой льняной салфеткой;

СОБЛЮДАТЬ ОСТОРОЖНОСТЬ!!! ПОВЕРХНОСТЬ ПРИЗМ НАДО БЕРЕЧЬ ОТ ЦАРАПИН!!!

- палочкой осторожно нанести на плоскость измерительной призмы одну - две капли дистиллированной воды и закрыть верхнюю камеру;
- направить луч света от осветителя в окно верхней камеры;
- перемещая рукоятку с окуляром вдоль шкалы, вводят в поле зрения границу светотени;
- резкость границы светотени, штрихов шкалы и перекрестия сетки устанавливают вращением гайки окуляра;

- вращая рукоятку дисперсионного компенсатора, устраняют окрашенность границы светотени;
 - поворачивая рычаг осветителя и вращая осветитель на оси, добиваются максимально контрастной границы светотени;
 - перемещая рукоятку, подводят границу к центру перекрестия сетки. Совмещение должно пройти через деление $n = 1,33299$ шкалы.
3. Измерение показателя преломления прозрачных жидкостей производится аналогично измерению n дистиллированной воды (п.2). Каждое измерение повторяется не менее трех раз. Среднее арифметическое трех отсчетов принимается за искомое.
4. При измерении показателя преломления твердых тел исследуемый образец должен быть оптически однородным и иметь две взаимно - перпендикулярные полированные плоскости, из которых одна должна быть равная по своим размерам входной грани измерительной призмы. Толщина образцов может быть любой, но не менее 0,15 мм.

Измерение производится в следующем порядке:

- открыть верхнюю камеру;
 - поверхность нижней измерительной призмы и большую полированную поверхность образца промыть дистиллированной водой и дать просохнуть;
 - на чистую полированную поверхность образца нанести 2-3 капли иммерсионной жидкости монобромнафталина и этой поверхностью установить образец на поверхность измерительной призмы так, чтобы малая полированная поверхность образ была обращена к осветителю. Слегка прижать образец к призме, чтобы жидкость распределилась равномерно по толщине слоя. О равномерности слоя можно судить по интерференционным полосам, которые видны через боковые грани образца. Количество полос должно быть не больше трех и направлены они должны быть параллельно падающему свету. Если полосы наклонены к направлению распространения света, то это значит, что жидкость распределилась в виде клина. В этом случае надо переустановить образец. После установки верхнюю часть камеры закрывают до упора на пружину;
 - перемещая осветитель и одновременно наблюдая за границей светотени в окуляр, добиваются несмещающейся резкой границы светотени;
 - подводят границу светотени к центру перекрестия и снимают показания шкалы.
5. Исследование зависимости показателя преломления раствора от концентрации:
- а) измерьте показатели преломления растворов различной концентрации C . Для каждого раствора измерение показателя преломления произведите три раза и найдите $\langle n \rangle$;
 - б) результаты измерений занесите в таблицу;
 - в) постройте график зависимости показателя преломления от концентрации $n(C)$;
 - г) измерьте показатель преломления n раствора неизвестной концентрации. Определите по графику концентрацию C_x раствора;
 - д) найдите по графику погрешность ΔC измерения концентрации раствора.

Задания

1. Проверить нуль-пункт прибора.
2. Определить концентрацию контрольного раствора.
3. Определить показатели преломления глицерина, этилового спирта.
4. Вычислить молекулярные рефракции воды, глицерина и этилового спирта.
5. Вычислить атомные рефракции углерода, водорода, кислорода.
6. Вычислить молекулярную рефракцию изопропилового спирта по атомным рефракциям углерода, водорода и кислорода.
7. Измерить показатель преломления изопропилового спирта и вычислить его молекулярную рефракцию. Сравнить с вычисленным значением.
8. Определить показатель преломления данного твердого вещества.
9. Исследовать зависимость показателя преломления раствора от концентрации.