

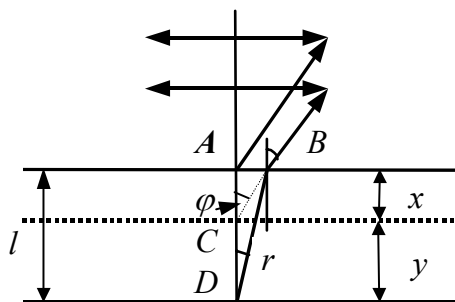
Работа 2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Цель работы: 1. Познакомиться с методами измерения показателя преломления жидких и твердых тел.

1. ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПА

Известно, что при наблюдении предмета сквозь слой воды или через стеклянную пластинку предмет всегда кажется расположенным ближе к наблюдателю, чем в действительности. Это кажущееся приближение связано с преломлением света на границе пластинки с воздухом и зависит как от толщины пластинки, так и от ее показателя преломления. Измеряя толщину пластинки с помощью микрометра, а кажущееся смещение предмета при наблюдении сквозь пластинку с помощью микроскопа, тубус которого снабжен микрометрическим винтом, можно определить показатель преломления пластинки.

Способ 1. Пусть на столике микроскопа лежит плоскопараллельная стеклянная пластинка толщиной l , а микроскоп сфокусирован на пылинки и царапинки, находящиеся на ее верхней стороне. Для того чтобы увидеть пылинки, находящиеся на нижней стороне пластинки, тубус микроскопа необходимо переместить на некоторое расстояние x (рис. 1). Вследствие преломления лучей на границе пластинки с воздухом, x будет меньше l .



Р и с. 1

Рассмотрим один из лучей, идущих в объектив микроскопа от метки, находящейся на нижней стороне пластинки. Из треугольников ABC и ABD следует, что

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{AB}{AC}, \quad \operatorname{tgr} = \frac{AB}{AD}$$

или с учетом того, что

$$AC = x, \quad AD = l, \quad \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tgr}} = \frac{l}{x}.$$

Если ограничиться малыми углами наблюдения (объектив микроскопа имеет малый апертурный угол), то

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tgr}} = \frac{\sin \varphi}{\sin r} = n$$

и, следовательно,
$$n = \frac{l}{x}. \quad (1)$$

Измеряя толщину пластинки l и перемещение тубуса микроскопа x при перефокусировке его с верхней стороны пластинки на нижнюю, можно по формуле (1) рассчитать коэффициент преломления n .

Способ 2. Пусть микроскоп сфокусирован на какой-либо штрих (царапинку), нанесенный на тонкое предметное стекло. Если положить затем на предметное стекло стеклянную пластинку толщиной l , то для фокусировки микроскопа на тот же штрих предметного стекла его тубус придется переместить вверх на некоторое расстояние y (рис. 1). Ограничиваясь малыми углами, найдем, что $y = l - x$ и, следовательно,

$$n = \frac{l}{l - y}. \quad (2)$$

Способ 3. Если для одной и той же пластинки поставить опыты по способам 1 и 2, то коэффициент преломления можно вычислить по формуле

$$n = 1 + \frac{y}{x}, \quad (3)$$

которая получена на двух предыдущих путем исключения l .

Микроскоп, используемый для измерения показателя преломления, должен удовлетворять следующим требованиям:

а) объектив должен быть достаточно длиннофокусным, так как в противном случае невозможно будет сфокусировать микроскоп на нижнюю сторону пластинки;

б) объектив должен иметь достаточно малую апертуру;

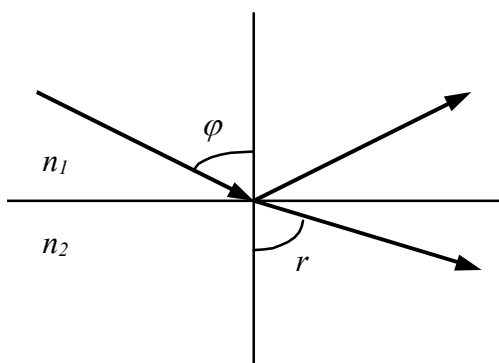
в) увеличение окуляра следует выбирать, по возможности, большим, чтобы глубина резкости при фокусировке была меньше.

Измерение показателя преломления проводят для двух образцов всеми тремя способами. Результаты измерений следует сравнить между собой.

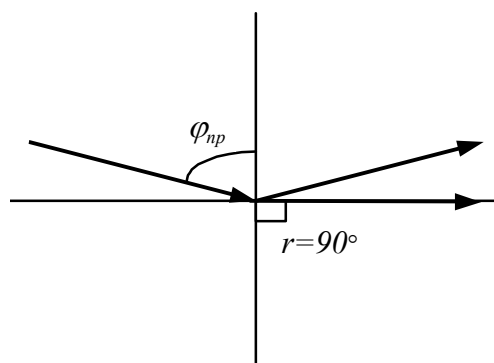
2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА АББЕ

Принцип работы рефрактометра Аббе основан на явлениях, происходящих на границе раздела сред с разными показателями преломления при прохождении через границу светового пучка, а точнее на явлении полного внутреннего отражения. Пусть луч света (рис. 2) падает на границу раздела двух сред со стороны оптически более плотной среды ($n_1 > n_2$). Связь угла преломления r с углом падения φ и параметрами сред n_1 , n_2 задается известным законом Снеллиуса

$$\frac{\sin \varphi}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (4)$$



Р и с. 2



Р и с. 3

Из анализа этого закона при $n_1 > n_2$ следует, что $r > \varphi$, т. е. углы преломления будут больше углов падения. При достижении углом падения некоторого значения φ_{np} , называемого *предельным углом*, угол преломления окажется равным 90° (рис. 3). Поэтому при падении света на такую границу под углом, значение которого равно или больше предельного, преломленной волны не существует, а весь свет полностью отражается обратно в первую среду. Наступает так называемое *явление полного внутреннего отражения*. Предельный или критический угол падения φ_{np} , соответствующий условию $r = 90^\circ$ определяется из закона преломления (4), который примет в этом случае вид:

$$\sin \varphi_{np} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (5)$$

При измерении показателя преломления с помощью рефрактометра Аббе можно пользоваться как *методом полного внутреннего*

отражения, так и методом скользящего угла. Рефрактометр применяется в основном для исследования жидкостей, взятых в небольших количествах, показатели преломления которых лежат в пределах 1.3÷1.7. Показатель преломления прозрачных сред определяют обычно в проходящем свете (метод скользящего луча), а полупрозрачных или мутных – в отраженном (метод полного внутреннего отражения).

Общий вид прибора представлен на рис. 4. С правой стороны на корпус выведены два маховика 8 и 7, на левой боковой стенке смонтированы светофильтр и зеркало 2. В верхней части корпуса размещен окуляр 1. Спереди находится рефрактометрический блок 9. Он состоит из двух призм. Нижняя неподвижная призма является измерительной, верхняя – осветительной. Обе призмы прямоугольные, сделаны из стекла с большим показателем преломления. Призмы обращены друг к другу гипотенузными гранями, между которыми имеется зазор шириной 0,1 мм. Зазор заполняется исследуемой жидкостью. Для поддержания у исследуемой жидкости постоянной температуры в оправах призм предусмотрены специальные камеры, через которые можно пропускать термостатирующую жидкость, а контроль температуры осуществлять с помощью термометра.

2.1. Измерение показателя преломления методом скользящего луча

При работе по методу скользящего луча рефрактометр и источник света (настольная лампа или осветитель) устанавливают так, чтобы свет падал на входное окно осветительной призмы. Для этого открывается заслонка 5 (рис. 4), при этом окно 6 измерительной призмы закрыто. С помощью ручки 4 верхняя осветительная призма отводится в сторону, на чистую полированную поверхность измерительной призмы осторожно, НЕ КАСАЯСЬ призм, наносится две-три капли жидкости, затем осветительная призма опускается и прижимается крючком 3. Лучи света проходят осветительную призму 3 (рис. 5, б), рассеиваясь на выходе из нее матовой гранью A_1B_1 , входят в исследуемую жидкость и падают на полированную грань AB измерительной призмы 2. Поскольку на рефрактометре исследуются вещества, показатель преломления которых ниже показателя преломления стекла, из которого сделана измерительная призма, то лучи всех направлений, преломившись на границе жидкость–стекло,

войдут в измерительную призму 2. Луч света, для которого угол падения равен 90° , называется *скользящим*. Луч $СМ$, близкий к скользящему, преломляясь на границе жидкость–стекло, пойдет в измерительной призме под максимальным или предельным углом преломления.

По закону преломления имеем:

$$\sin r_1 = \frac{n_c}{N}, \quad (6)$$

$$i_1 \rightarrow 90^\circ$$

$$\sin \varphi = N \sin r_2. \quad (7)$$

Из рис. 5, а следует также, что $\beta = r_1 + r_2$.

Исключая из уравнений промежуточные углы r_1 , r_2 , получаем формулу для определения показателя преломления исследуемого вещества n_c

$$n_c = \sin \beta \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi} - \sin \varphi \cos \beta, \quad (8)$$

где N – показатель преломления вещества измерительной призмы;

φ – угол выхода предельного луча из измерительной призмы;

β – преломляющий угол измерительной призмы.

Так как N и β сохраняются постоянными для данного прибора, то измерение показателя преломления сводится к измерению только угла φ , под которым выходит предельный (скользящий) луч. Это позволяет проградуировать шкалу прибора прямо в значениях показателя преломления.

Предельный луч, выходящий из измерительной призмы под углом φ , служит границей раздела света и тени, так как в измерительной призме лучей, преломленных под углом больших, чем r_1 предельное, не существует. Следовательно, измерения сводятся к определению положения границы светотени.

Для этого сначала с помощью окуляра 1 (рис. 4) добиваются отчетливой видимости перекрестия и шкалы, а поворотом зеркала 2 наилучшей ее освещенности. Вращая маховик 8, находят границу светотени и выводят ее в поле зрения окуляра.

Рефрактометр ИРФ-454

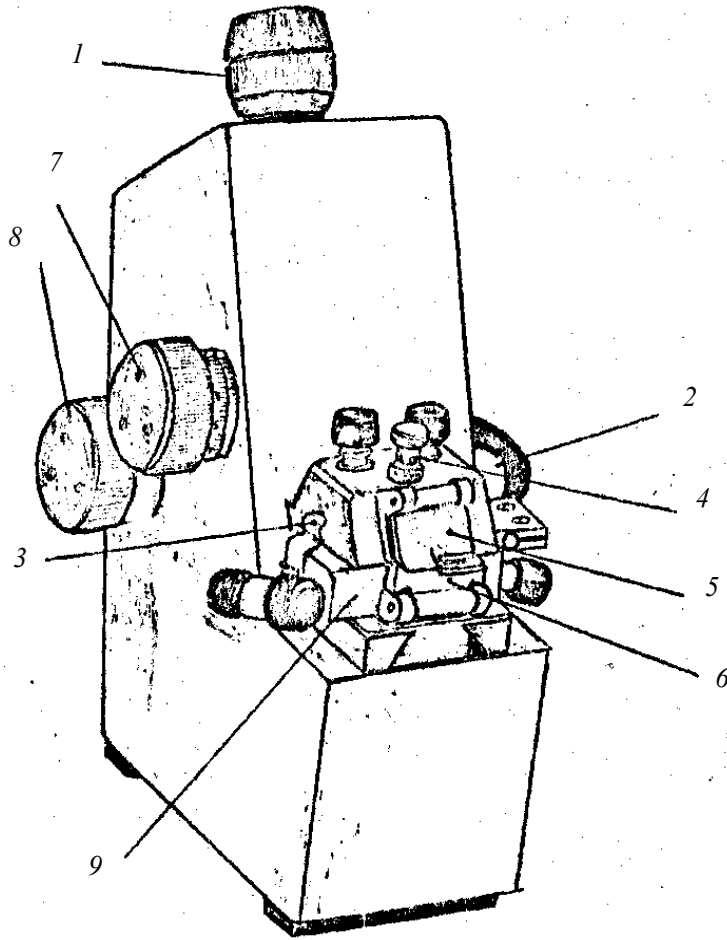


Рис. 4

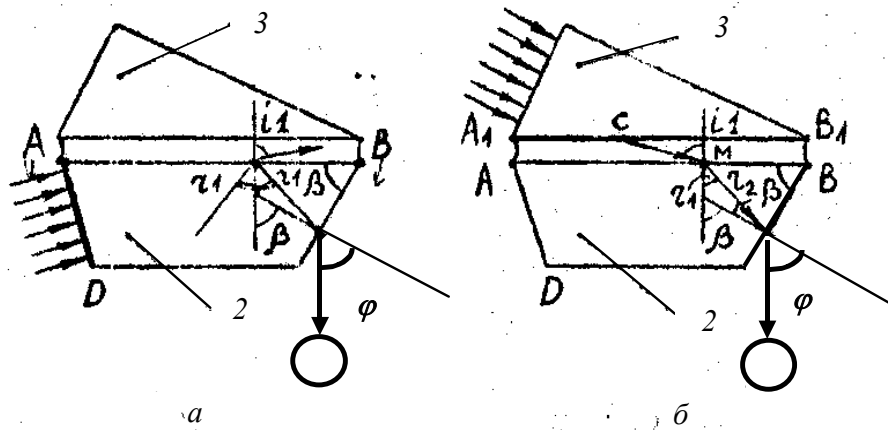
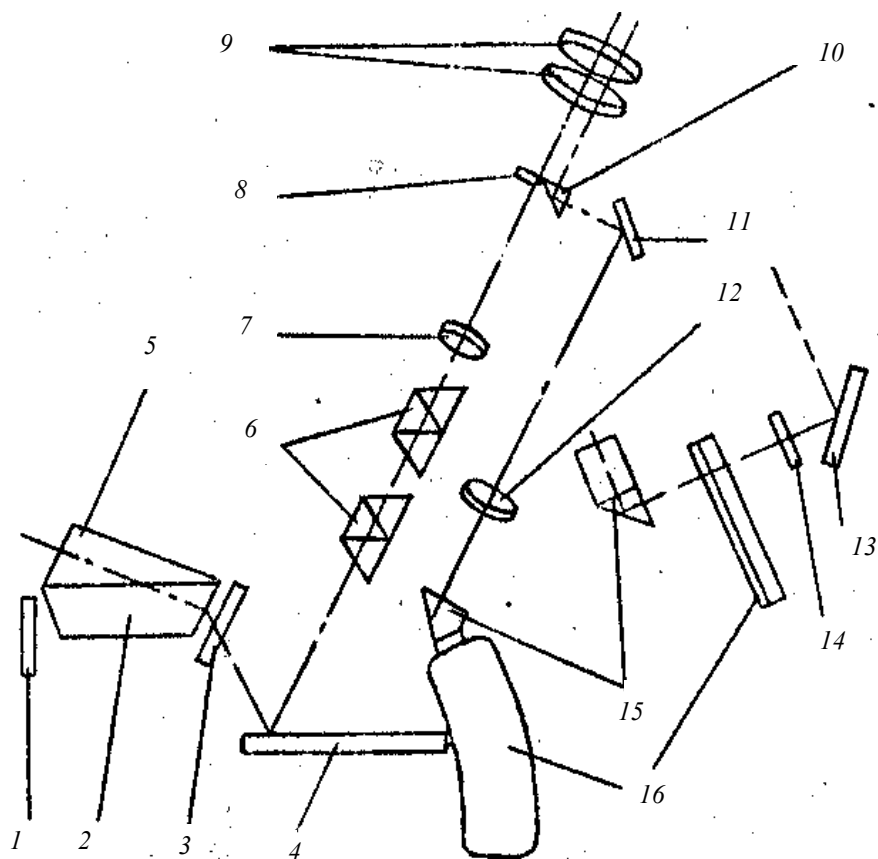


Рис. 5

Оптическая схема рефрактометра ИРФ-454



Р и с. 6

- | | |
|-------------------------|------------------|
| 1. Зеркало | 10. Призма AP-90 |
| 2. Измерительная призма | 11. Зеркало |
| 3. Стекло защитное | 12. Объектив |
| 4. Зеркало | 13. Зеркало |
| 5. Осветительная призма | 14. Светофильтр |
| 6. Компенсатор | 15. Призма |
| 7. Линза склеенная | 16. Шкала |
| 8. Сетка | |
| 9. Окуляр | |

Из-за дисперсии света видимая граница светотени может быть окрашенной. Для устранения окраски и измерения средней дисперсии исследуемого вещества служит компенсатор, состоящий из двух призм прямого зрения (призма Амичи), способных вращаться во взаимно противоположных направлениях. Призмы рассчитываются так, чтобы монохроматический луч с длиной волны $\lambda = 589,3 \text{ нм}$ не испытывал отклонения, а лучи с другими длинами волн отклонялись призмами в ту или иную сторону. Вращая призмы Амичи с помощью маховичка 7, следует добиться достаточно резкой границы светотени. Наблюдая в окуляр, границу светотени маховичком 8 точно выводят на перекрестие и по шкале показателей преломления снимают отсчет. Индексом для отсчета служит неподвижный вертикальный штрих. Целые, десятые, сотые и тысячные доли отсчитываются по шкале, десятичные доли оцениваются на глаз.

Оптическая схема прибора представлена на рис. 6.

При работе в отраженном свете измерительную призму 2 подсвечивают зеркалом 1, а в проходящем свете пучок света от настольной лампы падает на входное окно осветительной призмы 5. Пучок лучей, выходящий из измерительной призмы 2, в обоих случаях рассматривается в зрительную трубу, образованную линзами 7 и 9. Луч света, выходящий из призмы 2 под предельным углом, создает границу света и тени. Граница светотени, перекрестие сетки 8, штрихи шкалы 16 и отсчетный штрих призмы 10 оптической системой 15, 12, 11 проектируется в фокальную плоскость окуляра 9.

Наблюдая в окуляр 9, совмещают границу светотени с перекрестием сетки 8, разворачивая зеркало 4 и жестко связанную с ним шкалу 16, и снимают с этой шкалы отсчет величины показателя преломления. Для подсветки шкалы 16 и окраски ее служит зеркало 13, которое имеет разворот в двух плоскостях и зеленый светофильтр 14.

Для ахроматизации границы светотени служит компенсатор 6, состоящий из двух призм прямого зрения (призм Амичи).

2.2. Измерение показателя преломления по методу полного внутреннего отражения

При работе по методу полного внутреннего отражения окно 5 (рис. 4) осветительной призмы закрывается, открывается окно 6 и с помощью зеркала, которое находится на внутренней стороне этого окна, подсвечивается матовая грань измерительной призмы (рис. 5, а). Свет в этом случае падает на границу раздела AB под всевозможными углами. Так как показатель преломления исследуемого вещества

меньше, чем у вещества измерительной призмы, то согласно закону Снеллиуса углы преломления будут больше углов падения. При достижении углом падения некоторого, так называемого предельного значения, угол преломления i_1 окажется равным 90° . Поэтому при падении света под углом, значение которого равно или больше предельного, преломленной волны не существует, а весь свет полностью отражается в первую среду, наступает так называемое явление полного внутреннего отражения. Предельный или критический угол r_1 , соответствующий условию $i_1 = 90^\circ$, определяется опять же из закона преломления, который принимает в этом случае вид:

$$\sin r_1 = \frac{n_c}{N},$$

т. е. совпадает с формулой (6).

Следовательно, для определения показателя преломления исследуемого вещества мы можем пользоваться формулой (8). В поле зрения опять должна наблюдаться граница светотени, но картина будет менее контрастной, чем в методе скользящего луча. Так как условия, определяющие величину предельного угла, в обоих методах совпадают, то положение границы раздела оказывается одинаковым в обоих случаях. Определение положения границы светотени и отсчет значения показателя преломления в этом методе проводят точно в такой же последовательности, как и в методе скользящего луча. Метод полного внутреннего отражения позволяет к тому же измерить показатель преломления непрозрачных сред.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Рефрактометр Аббе можно использовать и для измерения показателя преломления твердых веществ. Исследуемый образец должен иметь плоскую полированную поверхность. Осветительная верхняя призма отводится в сторону, на полированную поверхность наносится небольшая капля иммерсионной жидкости (α -бромнафталина) для обеспечения оптического контакта. Показатель преломления иммерсионной жидкости должен быть больше показателя преломления образца и меньше или равен показателю преломления измерительной призмы. При наложении образца и умеренном нажиме на него иммерсионная жидкость должна равномерно распределиться по всей поверхности и не выступать за его края. А дальше измерения выполняются по описанной методике. Окуляр 1 (рис. 4) устанавливают на отчетливую видимость перекрестия. Поворотом зеркала 2 добиваются

наилучшей освещенности шкалы. Вращая маховик 8, границу светотени вводят в поле зрения окуляра, а маховиком 7 добиваются исчезновения окраски граничной линии. Наблюдая в окуляр, маховиком 8 наводится граница светотени точно на перекрестие и по шкале показателей преломления снимается отсчет.

4. ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДИСПЕРСИИ

Вследствие явления дисперсии показатель преломления зависит от длины волны. В практических каталогах обычно для характеристики вещества указывается значение показателя преломления для $\lambda = 589,3 \text{ нм}$ (среднее значение из длин волн двух близких желтых линий натрия), обозначая его символом n_D . Указывается также средняя дисперсия ($n_F - n_C$) или коэффициент дисперсии, определяемый по формуле:

$$n = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C},$$

где n_F относится к $\lambda = 486,1 \text{ нм}$ (синяя линия водорода), а n_C к $\lambda = 656,3 \text{ нм}$ (красная линия водорода).

Среднюю дисперсию можно определить с помощью рефрактометра Аббе. Для этого фиксируется поворот одной призмы компенсатора относительно другой, осуществляемый маховиком 7 (см. рис. 4) до полного устранения окрашенности границы светотени, при измерении показателя преломления образца.

Отсчет производится по шкале, вращающейся вместе с маховиком. Шкала разделена на 120 частей от 0 до 60 в обе стороны. Десятые доли определяются по нониусу. При полном повороте маховика граница раздела получается бесцветной дважды. При измерениях следует производить не менее 5 отсчетов с двух сторон шкалы и взять среднее значение этих отсчетов z . В зависимости от полученного значения z и показателя преломления n_D исследуемого вещества по прилагаемым к прибору таблицам определяем величину средней дисперсии и коэффициент дисперсии.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Меры предосторожности

Быстрее всего из строя выходят в приборе призмы, поэтому необходимо соблюдать некоторые меры предосторожности:

1. Поверхности призм очищайте после каждого измерения. Окон-

чив отсчет, откройте рефрактометрический блок и чистой мягкой салфеткой или листиком фильтровальной бумаги удалите основное количество жидкости с рабочих поверхностей призм и оправ. Полированную грань измерительной призмы вытирайте очень осторожно, без нажима, чтобы не повредить полировку. После этого призмы протирайте мягкой салфеткой. Рефрактометрический блок после промывки подержите некоторое время открытой для просушки.

2. При измерении показателя преломления твердых тел поверхности образцов тщательно очистите от пыли и грязи, промойте эфиром или спиртом и протрите чистой мягкой салфеткой. Оставшиеся на поверхности мелкие пылинки смахните мягкой кисточкой.

3. После измерений не оставляйте образец на призме, так как от продолжительного действия иммерсионной жидкости поверхность призмы мутнеет.

4. Большинство иммерсионных жидкостей ядовиты, поэтому обращаться с ними надо осторожно. Окончив работу, тщательно вымойте руки.

Перед началом измерений проверьте правильность работы рефрактометра, используя оба метода. Такой контроль может быть осуществлен по дистиллированной воде.

Так как при визуальном совмещении границы раздела света и тени с серединой креста нити наблюдатель допускает ошибки, то необходимо провести несколько измерений и определить среднее значение показателя преломления. Если средняя величина отличается более чем на $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ от табличного значения, то рефрактометр необходимо подъюстировать (выполняется преподавателем). Показатель преломления дистиллированной воды должен быть равным 1,33291 (при $t = 20^\circ\text{C}$).

З А Д А Н И Е

1. Измерить с помощью микроскопа показатели преломления различных стеклянных пластинок всеми тремя способами, описанными в инструкции. Результаты измерений сравнить между собой.
2. Проверить правильность работы рефрактометра Аббе, используя дистиллированную воду в качестве эталонной жидкости.
3. Измерить на рефрактометре Аббе показатели преломления чистого глицерина и растворов глицерина в воде с известной и неизвестной концентрацией. При измерениях использовать оба метода.
4. По данным измерений построить график зависимости показателя преломления от концентрации глицерина и определить с его помощью неизвестные концентрации растворов.
5. Измерить на рефрактометре показатели преломления стеклянных пластинок,

- которые исследовались в п. 1.
6. Определить среднюю дисперсию для 100 % глицерина и одной из исследуемых стеклянных пластинок.

В О П Р О С Ы

1. Объяснить физический смысл показателя преломления.
2. Описать способы измерения показателя преломления с помощью микроскопа.
3. Сформулировать основные законы геометрической оптики.
4. В чем заключается сущность явления полного внутреннего отражения?
5. Объяснить принцип работы рефрактометра Аббе.
6. Какой метод работы рефрактометра обеспечивает более контрастную границу светотени и почему?

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики: Оптика. М.: Наука, 1980.
2. *Ландсберг Г.С.* Оптика. М.: Наука, 1976 г.
3. Физический практикум. Электричество и оптика / Под ред. В.И. Ивероной. Наука, 1968. Задача 130.
4. *Шишловский А.А.* Прикладная физическая оптика. М.: 1961.
5. *Иоффе Б.В.* Рефрактометрические методы химии. 2-е изд. Л., 1974.