

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич  
Должность: ректор  
Дата подписания: 25.09.2022 14:42:14  
Уникальный программный ключ:  
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953ba730df2374d26675d0e5360f3c6

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра теоретической и экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ  
Первый проректор-  
Проректор по учебной работе  
\_\_\_\_\_ Е.А. Кудряшов  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ,  
КОНЦЕНТРАЦИИ И ДИСПЕРСИИ РАСТВОРОВ САХАРА С  
ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА АББЕ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
№ 64 по оптике для студентов инженерно-технических  
специальностей

Курск 2010

УДК 681.787.2

Составители: А.А. Родионов, Л.П. Петрова, В.Н. Бурмистров

Рецензент

Кандидат физико-математических наук, доцент *В.М. Пауков*

**Определение показателя преломления, концентрации и дисперсии растворов сахара с помощью рефрактометра Аббе** [Текст]: методические указания по выполнению лабораторной работы по оптике № 64 для студентов инженерно-технических специальностей / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.А. Родионов, Л.П. Петрова, В.Н. Бурмистров. Курск, 2010. 13 с.: ил. 7, табл. 1. Библиогр.: с.13.

Излагаются методические указания по работе с рефрактометром Аббе. Содержат краткие сведения по теории элементарной дисперсии.

Методические указания соответствуют требованиям программы, утвержденной учебно-методическим объединением для студентов инженерно-технических специальностей.

Предназначены для студентов инженерно-технических специальностей дневной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.  
Усл.печ.л. Уч.-изд.л. Тираж 100 экз. Заказ. Бесплатно.  
Курский государственный технический университет.  
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.



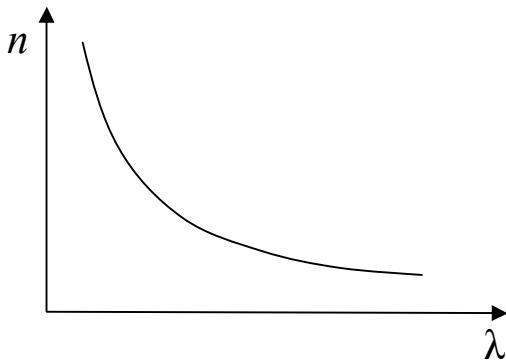
**Цель работы:** изучение зависимости показателя преломления и дисперсии растворов сахара от концентрации.

**Оборудование:** рефрактометр, дистиллированная вода, набор растворов сахара (глюкозы), пипетки, х/б салфетка.

### Теоретическое введение

Явление зависимости показателя преломления вещества от длины волны называют дисперсией света  $n = f(\lambda_0)$ , где  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме.

Дисперсией вещества называют производную  $n$  по  $\lambda_0$   $\left(\frac{dn}{d\lambda_0}\right)$ .



Для всех прозрачных сред в области видимого света с увеличением длины волны  $\lambda_0$  показатель преломления  $n$  уменьшается:  $\frac{dn}{d\lambda_0} < 0$   $\left(\frac{dn}{d\omega} > 0\right)$ . Такой характер зависимости  $n(\lambda_0)$  носит название *нормальной дисперсии*.

Если вещество поглощает часть спектра, то в области поглощения и вблизи нее ход дисперсии обнаруживает аномалию: на некотором участке более короткие волны преломляются меньше чем длинные, т.е.  $\frac{dn}{d\lambda_0} > 0$ . Такой ход зависимости  $n$  от  $\lambda_0$  называется *аномальной дисперсией*. Среды, в которых скорость световой волны зависит от  $\lambda_0$ , называются диспергирующими.

### Элементарная теория дисперсии

Показателем преломления среды называется отношение скорости света в вакууме к фазовой скорости света в данной среде  $n = c/v$ . Из макроскопической электромагнитной теории Максвелла следует, что  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ . Для большинства прозрачных сред  $\mu = 1$ , поэтому  $n = \sqrt{\epsilon}$ . Отсюда выявляются некоторые противоречия: величина  $n$ ,

являясь переменной, остается в то же время равной определенной постоянной. Кроме того, значения  $n$ , получаемые из этого выражения, не согласуются с опытом. Трудности объяснения дисперсии света с точки зрения электромагнитной теории Максвелла устраняются электронной теорией Лоренца. В теории Лоренца дисперсия света рассматривается как результат взаимодействия электромагнитных волн с заряженными частицами, входящими в состав вещества и совершающими вынужденные колебания в переменном поле волны.

Под действием поля  $E$  световой волны электронные оболочки атомов деформируются. Они становятся диполями с моментами  $p = -ex$ , где  $e$  – заряд электрона,  $x$  – смещение электрона. Если в единице объема  $N$  атомов, то дипольный момент:  $P = Np = -Nex$ .

Зная  $P$ , можно вычислить  $\varepsilon$  среды:

$$\varepsilon = 1 + \chi = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E}. \quad (3)$$

Найдем смещение электрона  $x$  под действием внешнего поля волны. В первом приближении можно считать, что вынужденные колебания совершают только оптические электроны, наиболее слабо связанные с ядром атома.

Уравнение вынужденных колебаний электрона запишем на основании 2-го закона Ньютона:  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ . Учтем, что на электрон будут действовать силы:

1. Квазиупругая сила, возвращающая (удерживающая) электрон в состоянии покоя  $F = -kx$ .
2. Сила трения излучения  $F = -rV$
3. Внешняя периодическая сила  $F = -eE$ , где

$$E = E_0 \cos(\omega t + \alpha), \text{ тогда}$$

$$-kx - rV - eE = ma, \quad V = \dot{x}, \quad a = \ddot{x} \quad \text{или}$$

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + kx = -eE_0 \cos(\omega t + \alpha). \quad (4)$$

Пренебрежем для простоты расчетов силой трения излучения:

$\ddot{x} + \omega_0^2 x = -\frac{eE_0}{m} \cos(\omega t + \alpha)$ , где  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  – собственная частота колебаний электрона.

Из механики известно, что решением этого дифференциального уравнения является выражение:

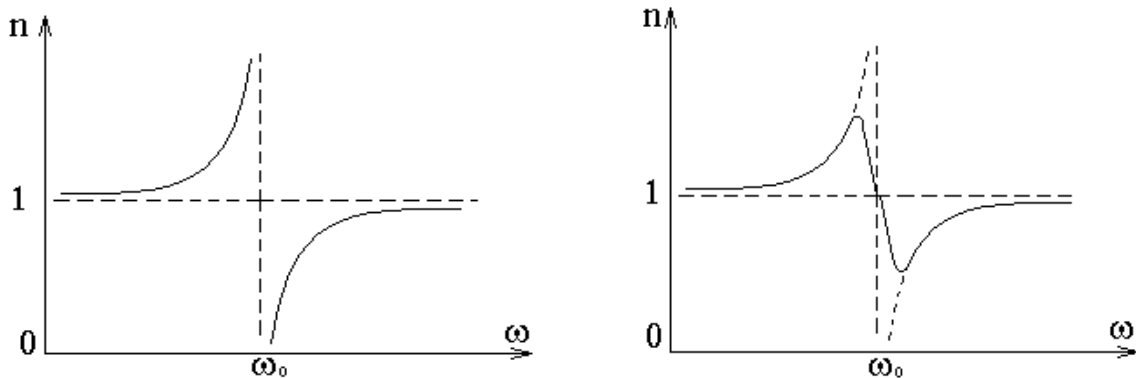
$$x = A \cos \omega t, \quad (5)$$

где  $A = \frac{-\frac{e}{m} E_0}{(\omega_0^2 - \omega^2)}$  – амплитуда вынужденных колебаний электрона.

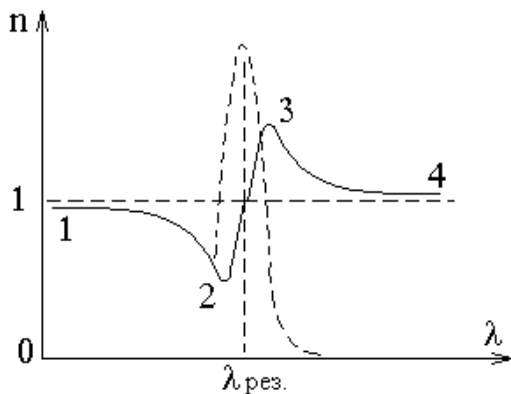
Подставляя (5) в (3), окончательно получим:

$$n^2 = 1 + \frac{N e^2}{\epsilon_0 m} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что при приближении частоты электромагнитной волны  $\omega$  к собственной частоте электронов в молекуле справа и слева показатель преломления стремится к  $-\infty$  или  $+\infty$ , соответственно. Это происходит потому, что мы пренебрегли трением излучения. Учет этой силы несколько меняет характер зависимости.



Таким образом, вблизи собственной частоты функция  $n = f(\omega)$  терпит разрыв, в этой области наблюдается сильное поглощение электромагнитных волн.



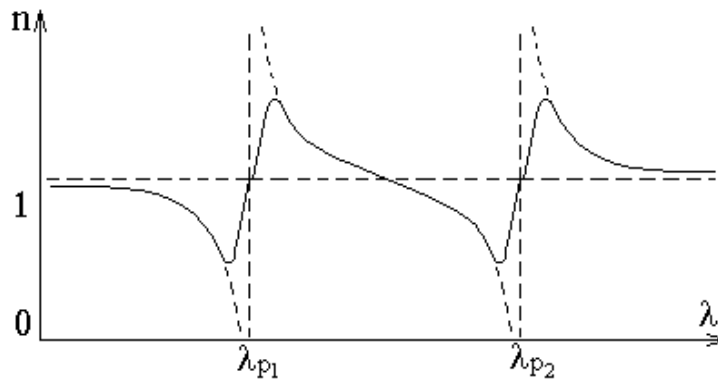
При переходе от  $n = f(\omega)$  к  $n = f(\lambda)$ , получим зависимость несколько иного вида. Пунктирная кривая характеризует поглощение света в области данной длины волны  $\lambda_{рез}$ . Участки 1-2 и 3-4 – нормальная дисперсия:  $n$  убывает с ростом  $\lambda$  и  $\frac{dn}{d\lambda} < 0$ . На участке 2-3 наблюдается

аномальная дисперсия  $\frac{dn}{d\lambda} > 0$  и  $n$  растет с ростом  $\lambda$ .

Если учесть все заряды атомов, то из (6) получим:

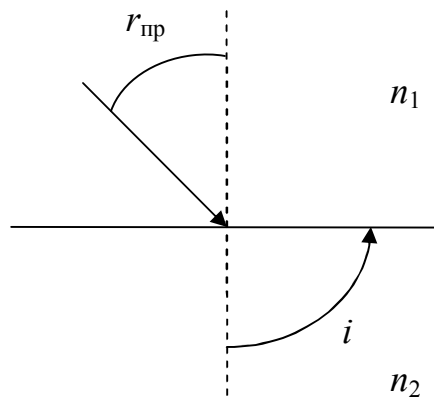
$$n^2 = 1 + \frac{N}{\varepsilon_0} \sum_i \frac{e_i^2}{m(\omega_{0i}^2 - \omega^2)}. \quad (5)$$

Здесь суммирование производится по всем видам зарядов. Таким образом, аномальная дисперсия объясняется резонансным поглощением световой волны.



Из сказанного следует, что показатель преломления вовсе не является константой, как это негласно предполагается в законе преломления. Поэтому измерения показателя преломления следует проводить для монохроматического излучения. Чаще всего используется длина волны  $\lambda_D = 589,3 \cdot 10^{-9}$  м. Для приближенных измерений можно применять не монохроматический свет, используя явление *полного внутреннего отражения*, как это делается в рефрактометре Аббе, предназначенном для технических измерений.

Явление полного внутреннего отражения наблюдается на границе раздела двух сред при переходе света из оптически более плотной среды  $n_1$  в оптически менее плотную  $n_2$ , например, из стекла в воду. При увеличении угла падения угол преломления тоже будет увеличиваться. Когда угол падения достигнет некоторого предельного значения  $r_{пр}$ , преломленный луч исчезнет, и свет будет полностью отражаться. Учитывая, что угол преломления при наступлении явления полного внутреннего отражения равен  $90^\circ$ , из закона преломления следует:



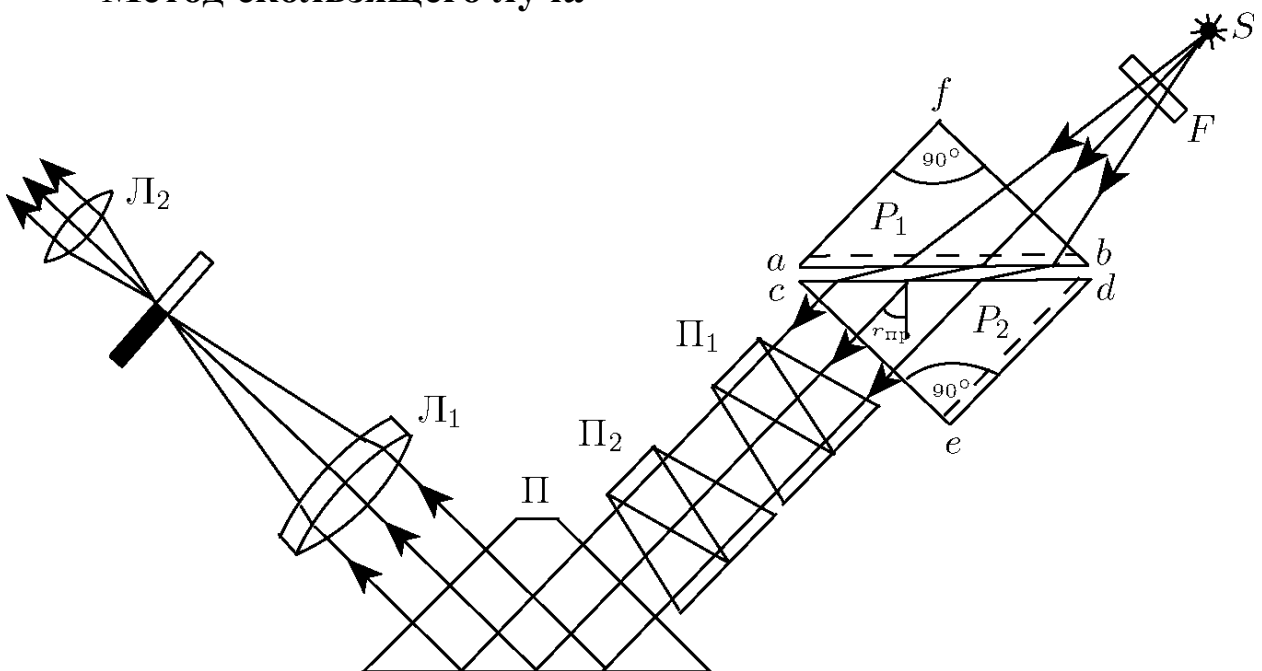
$\sin r_{\text{пр}} = n_2/n_1$ , если свет выходит в воздух, то  $n_2 = 1$  и  $n_1 = 1/\sin r_{\text{пр}}$ .

Таким образом, измерение показателя преломления сводится к измерению предельного угла полного внутреннего отражения, на чем и основана работа рефрактометра Аббе.

### Рефрактометр Аббе.

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

#### Метод скользящего луча





Основной частью рефрактометра являются две 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. Свет проникает в призму  $P_1$  через грань  $bf$  и попадает в жидкость через матовую грань  $ab$ . Свет, рассеянный матовой поверхностью, проходит слой жидкости и под всевозможными углами падает на грань  $cd$  призмы  $P_2$ .

Скользющему лучу в жидкости ( $i = 90^\circ$ ) соответствует предельный угол преломления  $r_{\text{пр}}$ . Преломленные лучи с углами больше  $r_{\text{пр}}$  не возникают. В связи с этим угол выхода лучей из грани  $ce$  может изменяться лишь в некотором интервале.

Если свет, выходящий из грани  $ce$  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 находится изображение шкалы величин показателя преломления и указатели: нить и перекрестие. Вращая призму и, следовательно, изменяя наклон предельного пучка лучей относительно оси зрительной трубы, можно добиться, чтобы граница света и тени оказалась в поле зрения окуляра  $L_2$  и совпала с положением указателя. При вращении призмы поворачивается и шкала показателя преломления, установленная на пластине жестко связанной с призмой. Значение показателя преломления жидкости отсчитывается по шкале на уровне резкой границы света и тени.

Если источник света  $S$  не является монохроматическим, то наблюдаемая в окуляре трубы граница света и темноты часто оказывается размытой и окрашенной из-за дисперсии показателя преломления исследуемого вещества. Для того чтобы получить и в этом случае резкое изображение границы, на пути лучей, выходящих из призмы  $P_2$ , помещают компенсатор с переменной дисперсией. Компенсатор содержит две одинаковые дисперсионные призмы Амичи (призмы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ ) каждая из которых состоит из трех склеенных призм, обладающих различными дисперсиями и показателями преломления. Призмы рассчитывают так, чтобы монохрома-

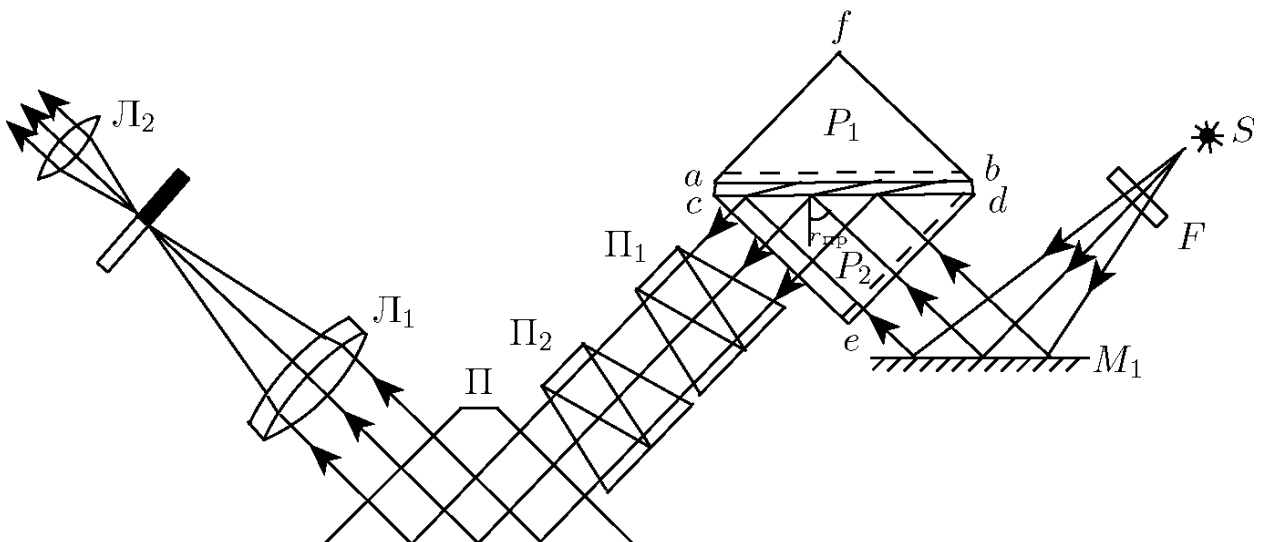
тический луч с  $\lambda_D = 589,3$  нм (среднее значение длины волны желтого дуплета натрия) не испытывал отклонения. Лучи с другими длинами волн отклоняются. В зависимости от взаимной ориентации призм дисперсия компенсатора изменяется в пределах от нуля до удвоенного значения дисперсии одной призмы.

Для поворота призм друг относительно друга служит специальная рукоятка, с помощью которой 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 приводятся значения показателя преломления.

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

Применяемая в рефрактометре Аббе поворотная призма  $\Pi$  (призма Дове) позволяет сделать прибор более компактным.

### Метод полного внутреннего отражения



В этом случае свет от источника  $S$  после отражения от зеркала  $M_1$  падает на матовую грань  $ed$  призмы  $P_2$  (в методе скользящего луча эта поверхность закрывается металлической шторкой). После

рассеяния на грани  $ed$  свет падает на границу раздела стекло-жидкость под всевозможными углами. При  $r > r_{\text{пр}}$  наступает полное внутреннее отражение, при  $r < r_{\text{пр}}$  свет отражается частично. В поле зрения трубы наблюдается граница света и полутени.

Так как условия, определяющие величину предельного угла в методе скользящего луча и в методе полного внутреннего отражения, совпадают, положение линии раздела в обоих случаях также оказывается одинаковым.

Заметим, что, в отличие от метода скользящего луча, метод полного внутреннего отражения позволяет измерять показатели преломления непрозрачных веществ.

### Рефрактометрия

Показатели преломления жидких и твердых тел могут измеряться с большой точностью. При данной температуре и для данной длины волны они являются важнейшей характеристикой вещества. Измерения показателей преломления может быть использовано для исследования веществ. Соответствующий раздел науки носит название рефрактометрии. Обычно эти измерения проводятся для  $D$  – линии натрия. Однако, нередко преломляющее вещество характеризуют величиной относительной дисперсии, под которой понимают отношение:

$$n_F - n_C / n_D - 1, \quad (7)$$

где  $n_F$  – показатель преломления синей линии водорода для  $\lambda_F = 486,1$  нм;  $n_C$  – показатель преломления красной линии водорода для  $\lambda = 656,4$  нм.

В каталогах же обычно фигурирует величина, обратная относительной дисперсии – число Аббе:

$$v = n_D - 1 / n_F - n_C. \quad (8)$$

Это важная характеристика стекла, так как она свидетельствует о наличии хроматических aberrаций, вызывающих, например, снижение остроты зрения у людей, носящих очки. Как правило, чем больше показатель преломления, тем меньше число Аббе и сильнее выражена хроматическая дисперсия. Число Аббе для очковых линз варьируется от 30 до 58. С увеличением числа Аббе повышается «комфортность» линзы.

Обычно, но не всегда, дисперсия растет вместе со средним значением показателя преломления. С помощью рефрактометра по формуле (8) можно определить число Аббе. Для этого вращая головку с накаткой необходимо устранить окрашенность границы раздела света и тени. Затем по шкале головки определить число  $Z$  и по нему из таблицы 1 выписать  $\sigma$ . Далее, используя внутреннюю шкалу прибора, находят  $n_D$  и  $C$  (концентрацию раствора в процентах), а зная  $n_D$  по таблице 2 определяют значения  $A$  и  $B$ . Обе таблицы находятся у лаборанта. Поскольку

$$A+B \sigma = n_F - n_C \quad (9)$$

по формуле (8) можно рассчитать число Аббе.

**Пример:** Вода при  $20^\circ\text{C}$ . Показатель преломления, определенный по прибору из 5 измерений  $n_D = 1,3330$ . Отсчет по шкале 2 компенсатора окраски  $Z = 41,9; 41,8; 41,9; 41,8; 41,9$ . Тогда средняя величина  $B = 0,03220$ ;  $\sigma = -0,584$ ;  $A = 0,02471$ ;

$$B \cdot \sigma = 0,03220 \cdot (-0,584) = -0,01880$$

$$A + B \cdot \sigma = 0,00591 = n_F - n_C;$$

$$v = n_D - 1 / n_F - n_C = 0,3330 / 0,00591 = 56,3$$

### Порядок работы на приборе:

1. Для определения показателя преломления  $n_D$  и концентрации сахарного раствора в процентах поднимают прикрывающую призму, наносят на горизонтальную поверхность измерительной призмы несколько капель раствора и осторожно опускают призму.

2. Направив источник света на призму, добиваются максимальной освещенности в поле зрения с перекрестием.

3. Зеркало необходимо отвести от корпуса, обеспечив достаточную освещенность шкалы отсчета в нижней части поля зрения (метод полного внутреннего отражения).

4. Вращая за накатку окуляр, получить резкое изображение перекрестия нитей.

5. Далее необходимо устранить окраску и подвести границу раздела света и тени к перекрестию нитей.

6. По верхней шкале снять отсчет  $n_D$  до тысячных долей, десятитысячную оценить на глаз. Концентрацию  $C$  в процентах с

точностью до десятых долей определить по нижней шкале.

### Порядок выполнения работы:

1. Пользуясь указаниями по работе с прибором определить три раза  $n_D$ ,  $Z$  и  $C$  для каждого из растворов и для дистиллированной воды, начиная измерения с параметров воды. Результаты измерений занести в таблицу.

2. По средним значениям  $n_D$  найти  $\sigma$ ,  $A$  и  $B$ . Вычислить число Аббе  $v$  для каждого раствора и дистиллированной воды.

	$n_D$	$Z$	$C \%$	$\langle A \rangle$	$\langle B \rangle$	$\langle \sigma \rangle$	$\langle v \rangle$
Дистилли- рованная вода	1.	1.	1.				
	2.	2.	2.				
	3.	3.	3.				
	$\langle n_D \rangle$	$\langle Z \rangle$	$\langle C \rangle$				
1 раствор	1.	1.	1.				
	2.	2.	2.				
	3.	3.	3.				
	$\langle n_D \rangle$	$\langle Z \rangle$	$\langle C \rangle$				
2 раствор	1.	1.	1.				
	2.	2.	2.				
	3.	3.	3.				
	$\langle n_D \rangle$	$\langle Z \rangle$	$\langle C \rangle$				
3 раствор	1.	1.	1.				
	2.	2.	2.				
	3.	3.	3.				
	$\langle n_D \rangle$	$\langle Z \rangle$	$\langle C \rangle$				

3. Построить графики зависимости  $n_D = f(C)$  и  $v = f(n_D)$ .

4. После выполнения каждого измерения необходимо тща-

тельно удалять остатки предыдущего раствора с измерительных поверхностей призм, пользуясь х/б салфеткой.

5. Не допускать проливания растворов на прибор. По окончании работы прибор накрыть чехлом, растворы сдать лаборанту.

### **Контрольные вопросы:**

1. Основные законы геометрической оптики: законы отражения и преломления света с точки зрения волновой теории.

2. Абсолютный и относительный показатели преломления света, их физический смысл.

3. Явление полного внутреннего отражения и его применение в данной работе.

4. Дисперсия света, нормальная и аномальная дисперсия, теория дисперсии света.

5. Устройство, принцип действия и назначение рефрактометра.

### **Библиографический список:**

1. **Савельев И. В.** Курс общей физики т.2 [Текст]: учеб. пособие / И. В. Савельев; М.: Наука, 1989.

2. **Детлаф А. А., Яворский Б. М.** Курс физики т.3 [Текст]: учеб. пособие / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский; М: Высшая школа, 1989.

3. **Ландсберг Г. С.** Оптика [Текст]: учеб. пособие / Г. С. Ландсберг; М.: Наука, 1976.