

# Измерение показателя преломления стекла по углу наименьшего отклонения светового пучка призмой.

## Введение.

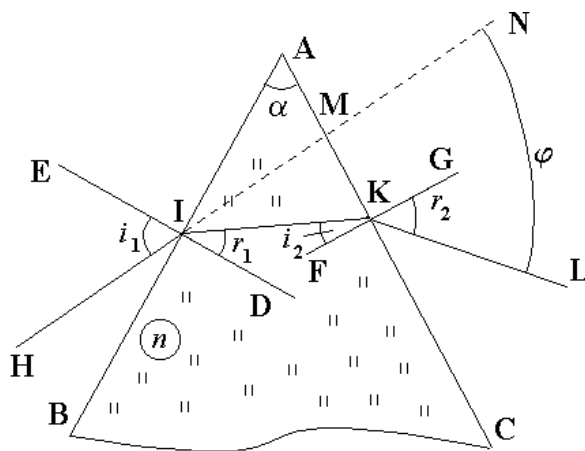
Цель работы – исследование дисперсии света в стекле, т.е. измерение показателя преломления оптического стекла как функции длины волны оптического излучения. Измерения проводятся на гониометре по "углу наименьшего отклонения" светового пучка стеклянной призмой<sup>1</sup>. Источником света служит ртутная газоразрядная лампа, так что показатель преломления стекла измеряется для дискретного ряда длин волн, соответствующих спектральным линиям излучения разряда в парах ртути.

*Дисперсией* называют явление, лежащее, в частности, и в основе диспергирующей способности призмы, – это зависимость показателя преломления вещества или, что то же самое, скорости света в веществе, от длины волны. Дисперсия света описывается параметром  $\frac{dn}{d\lambda}$ , где  $n$  – показатель преломления,  $\lambda$  – длина волны.

С другой стороны, чтобы количественно описать способность призмы (или другого спектрального прибора) по-разному отклонять свет в зависимости от его длины волны, вводят величину, называемую *угловой дисперсией (призмы или другого спектрального прибора)* и определяемую как  $D = \frac{d\varphi}{d\lambda}$ , где  $\varphi$  – угол отклонения луча спектральным прибором. Таким образом, с точки зрения терминологии следует понимать различие взаимосвязанных понятий дисперсии света и угловой дисперсии спектрального прибора.

## 1. Описание прохождения светового пучка через призму в рамках геометрической оптики.

Для отклонения светового пучка призмой он должен пройти через две ее плоские грани, именуемые для краткости в данном описании "рабочими гранями" призмы. Будем рассматривать только такие световые лучи, которые лежат в плоскости, перпендикулярной к тому ребру призмы, на котором пересекаются ее рабочие грани. В этой же плоскости лежат нормали к рабочим граням призмы. Ход такого светового луча через призму показан на **Рис.1** (показано сечение призмы указанной плоскостью).



**Рис.1.** Ход лучей через призму.

<sup>1</sup> Режим «угла наименьшего отклонения» наиболее часто применяется при конструировании спектральных приборов, основанных на применении призм в качестве диспергирующих элементов.

На **Рис.1** ребро призмы отображается точкой **A**, рабочие грани – прямыми **AB, AC**, нормали к граням – прямыми **DE, FG**. Плоский угол между рабочими гранями призмы, известный под названием **преломляющего угла**, равен углу **BAC** между прямыми **AC, BC**; обозначим его  $\alpha$ . Показатель преломления материала призмы обозначим  $n$ . Предметом нашего интереса будет величина  $n$ , причем в виде функции  $n(\lambda)$ , где  $\lambda$  – длина волны монохроматического света, образующего световой пучок.

Угол падения луча **HI** на грань **AB** есть угол между лучом **HI** и нормалью к грани – **DE**. Обозначим его  $i_1$ . В результате преломления на рабочих гранях призмы, рассматриваемый луч **HI** в дальнейшем идет по прямым **IK** и **KL**, причем, согласно соотношениям Снеллиуса-Декарта,

$$\frac{\sin i_1}{\sin r_1} = n; \quad (1)$$

$$\frac{\sin r_2}{\sin i_2} = n, \quad (2)$$

где смысл углов  $i_2, r_1, r_2$  непосредственно ясен из **Рис.1**.

Теперь выразим итоговый угол отклонения луча  $\varphi$  (см. **Рис.1**) через преломляющий угол  $\alpha$  и углы, входящие в соотношения (1), (2).

Сумма углов треугольника **AIK** равна

$$\pi = \alpha + \left(\frac{\pi}{2} - r_1\right) + \left(\frac{\pi}{2} - i_2\right),$$

откуда вытекает

$$\alpha = r_1 + i_2. \quad (3)$$

Для нахождения угла  $\varphi$  полезно сделать следующие построения: продлим прямую **HI**, точка **M** будет точкой пересечения полученной прямой **HN** с гранью призмы **AC**. Тогда угол  $\varphi$  будет равен разности углов **NMC** и **LKC**; в свою очередь угол **LKC** равен

$\left(\frac{\pi}{2} - r_2\right)$ , а угол **NMC** равен углу **IMA**, а именно:  $\left[\pi - \alpha - \left(\frac{\pi}{2} - i_1\right)\right]$ . Таким образом:

$$\varphi = \pi - \alpha - \left(\frac{\pi}{2} - i_1\right) - \left(\frac{\pi}{2} - r_2\right) \quad (4)$$

$$\text{или } \varphi + \alpha = i_1 + r_2$$

Уравнений (1) – (4) достаточно, чтобы выразить угол  $\varphi$  через углы  $\alpha, i_1$ , исключив все остальные углы, т.е. получить искомое уравнение, из которого можно было бы найти показатель преломления. Но этого мы делать не будем, так как в общем случае это весьма громоздкое уравнение. Нас же, собственно, интересует лишь симметричный случай

$$i_2 = r_1 = \frac{\alpha}{2}, \quad i_1 = r_2 = \frac{\varphi + \alpha}{2}, \quad \sin i_1 = n \sin r_1 \quad (5)$$

(мы применили соотношения (1) и (2)). Тогда угол отклонения луча находится из простого уравнения

$$\sin\left(\frac{\varphi_{sym} + \alpha}{2}\right) = n \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (6)$$

Уравнение (6) позволяет найти показатель преломления  $n$  на основании измерений угла при вершине призмы  $\alpha$  и угла отклонения луча при симметричном ходе лучей через призму:  $\varphi_{sym}$ .

### Примечания о терминологии

- 1) Мы намеренно при данном выводе игнорировали любые другие элементы призмы, кроме "рабочих граней" (на Рис.1 –  $AB, AC$ ) и объединяющего их ребра ( $A$ ), поскольку в задаче о преломлении луча другие элементы исследуемого прозрачного тела не играют никакой роли. Строго говоря, только третья грань ( $BC$ ), если она прозрачна и вообще присутствует как плоскость, позволит утверждать, что в *математическом* смысле мы имеем призму, а, например, не пирамиду, в зависимости от того, параллельна ли третья грань  $BC$  противолежащему ей ребру, или нет. **Однако наличие третьей грани призмы станет принципиально важно, как только мы начнем измерять углы между гранями, – для контроля измерений угла по условию "замыкания" угла поворота на полный угол  $2\pi$ .**
- 2) Упомянутая выше третья грань,  $BC$ , – это основание треугольника  $ABC$ . Однако **основаниями призмы как пространственного тела** являются параллельные к плоскости чертежа треугольные грани  $A'B'C', A''B''C''$  (расположенные "над" и "под" плоскостью чертежа). В этом смысле, когда говорят, что **призму следует брать руками за основания**, имеют в виду именно эти верхнюю и нижнюю грани, которые часто даже не полируются.

Осталось выяснить, каким же образом мы в условиях эксперимента могли бы отличить симметричный ход лучей от какого-либо другого: иными словами, нужно выработать *экспериментальный критерий* этого. Ответ заключается в том, что  $\varphi_{sym}$  – **минимальное значение угла отклонения**.

При равных, но противоположных по знаку углах поворота призмы по отношению к исходному ее положению, соответствующему случаю симметричного хода лучей через призму, два значения  $\varphi$  равны друг другу (эти симметричные положения призмы эквивалентны друг другу, потому что в геометрической оптике любой ход лучей можно изменить на обратный). Отсюда следует, что  $\varphi_{sym}$  – экстремальное значение угла отклонения. Остается выяснить, – максимальное или минимальное. Нетрудно показать, что в частном случае нормального (перпендикулярного) падения луча на грань призмы следует

$$\sin(\varphi + \alpha) = n \sin \alpha \quad (7)$$

и  $\varphi > \varphi_{sym}$  (конечно, это будет лишь при условии, что такой ход лучей вообще возможен, т.е. при  $n \sin \alpha < 1$ ). Это, однако, не является доказательством, а лишь правдоподобным соображением, поскольку не доказан монотонный ход  $\varphi$  во всем диапазоне углов поворота призмы.

Доказательство того, что угол  $\varphi_{sym}$  в (6) есть угол *минимального* отклонения, основанное на аналитическом исследовании выражения для угла  $\varphi$  как функции угла  $i_1$ , приведено в **Приложении 1**.

В принципе, конечно, можно определить показатель преломления и при произвольной установке призмы, измеряя углы  $\alpha, i_1, \varphi$  (или вместо них, эквивалентно,  $\alpha, i_1, r_2$ ), хотя такой метод не только сложнее, но и является несколько менее точным, поскольку, во-первых, он содержит одно лишнее измерение (измеряются три угла вместо двух), и, во-вторых, уравнение для вычисления  $n$  оказывается квадратным.

Однако, кроме соображений простоты, имеется существенно более важная причина, заставляющая предпочесть метод наименьшего отклонения любому другому. Она связана с тем, что **понятие одиночного луча является довольно грубой абстракцией**. В приближении геометрической оптики должны рассматриваться **пучки лучей**.

Если мы заменим одиночный луч – пучком, то приведенное выше рассмотрение будет справедливо только для пучка света, образованного *параллельными* друг другу лучами. Исходя из этого, в спектральных приборах стремятся формировать *параллельный пучок* лучей, помещая входную щель прибора в фокальную плоскость объектива. Этот метод создания параллельного пучка света называется **коллимацией**, а устройство, образованное таким сочетанием освещаемой щели и объектива, – **коллиматором**.

Каково бы ни было качество исполнения коллиматора, однако непараллельность лучей неизбежно сохраняется, например, из-за остаточных (неисправленных) погрешностей оптической системы сферических линз, составляющих объектив коллиматора, а также из-за исчезающей зависимости фокусного расстояния объектива от длины волны света. Преломление же в призме, как и вообще преломление на одной или нескольких плоских поверхностях, в случае непараллельности лучей имеет свойство нарушать *гомоцентричность* пучка, т.е. сходимость лучей в одной точке. В этом случае гомоцентрический пучок (исходящий из одной точки) преобразуется в негомоцентрический (или *астигматический*) пучок – таким образом, теряется возможность получить четкое *изображение* исходной точки – как действительное, так и мнимое. В случае спектрального прибора это означает искажение изображения входной щели коллиматора, т.е. ограничение возможности получить качественное изображение спектра, стоит только коллимации пучка отклониться от идеальной.

Однако если призма установлена в положение минимального отклонения, то тогда ее искажающее действие минимально, поскольку все лучи, падающие под углом, близким к  $i_1^{(sym)}$ , отклоняются

практически на один и тот же угол  $\varphi_{sym}$  (в точке минимума  $\frac{d\varphi}{di_1} = 0$ ). Благодаря этому пучок

отклоняется с наименьшим нарушением гомоцентричности.

Исходя из этих соображений, призму в спектральных приборах устанавливают, как правило, в положение наименьшего отклонения для исследуемой области спектра, а для работы в различных областях спектра – предусматривают возможность автоматической подъюстировки призмы непосредственно в процессе перестройки прибора по длине волны.

Конечно, если угол расходимости пучка в призме очень велик, то его гомоцентричность все же будет нарушена, но даже в этом крайнем случае такие искажения будут минимальными.

## 2. Программа измерений

В качестве результата работы должна быть получена экспериментальная зависимость (график с погрешностями) показателя преломления оптического стекла от длины волны излучения.

Из изложенного в предшествующем разделе ясен простейший способ измерения показателя преломления вещества, из которого изготовлена призма. Он состоит из следующих шагов (их содержание будет более подробно обсуждено ниже):

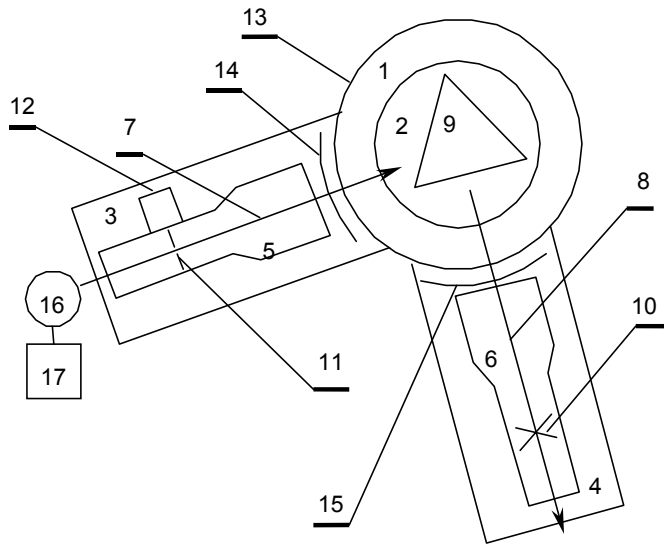
- 1) измерить преломляющий угол призмы;
- 2) выделить из линейчатого спектра источника излучение с определенной длиной волны;
- 3) установить призму так, чтобы падающий пучок лучей был параллельным, а падающие и преломленные лучи – ортогональными ребру призмы;
- 4) установить призму в положение наименьшего отклонения и измерить полученный угол отклонения,
- 5) вычислить показатель преломления при помощи выражения (6).

В предыдущем изложении предполагалось, что на призму падает монохроматический свет. Если же падающий свет является смесью нескольких монохроматических излучений с длинами волн  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ , то, благодаря (искомой) зависимости показателя преломления от длины волны, мы получим различные углы минимального отклонения  $\varphi_1^{(min)}, \varphi_2^{(min)}, \dots, \varphi_i^{(min)}$  для каждой такой составляющей излучения, и по каждому измеренному значению вычислим свое соответствующее значение показателя преломления  $n_1, n_2, \dots, n_i$ . Тем самым, мы исследуем дисперсию света в материале призмы.

### 3. Описание лабораторной установки

Измерения проводятся на спектрогониометре по "углу наименьшего отклонения" светового пучка стеклянной призмой. Источником света служит ртутная лампа, так что показатель преломления стекла измеряется для дискретного ряда длин волн, соответствующих спектральным линиям излучения разряда в парах ртути.

Функциональная схема лабораторной установки в упрощенном виде показана на **Рис.2.** **Перед работой следует обязательно изучить более детальное описание устройства спектрогониометра и методов его юстировки [1], которое воспроизведено в Приложениях 2, 3.**



**Рис.2.** Упрощенная блок-схема установки.

Спектрогониометр **1** состоит из установленных на общей вертикальной оси поворотного столика **2** и двух кронштейнов: неподвижного **3** и поворотного **4**; на кронштейнах закреплены коллиматор **5** и зрительная труба **6**. Обычно условием правильной работы гониометра является выставление оптических осей **7,8** коллиматора **5** и зрительной трубы **6** ортогонально по отношению к вертикальной оси вращения, а плоских отражающих поверхностей тела **9** – параллельно этой оси. Для этого как поверхность столика, так и оптические оси коллиматора **5** и зрительной трубы **6** могут юстироваться в вертикальных плоскостях по угловым координатам по отношению к вертикальной поворотной оси гониометра (в дополнение к вращению вокруг нее, которое является не элементом юстировки прибора, а составной частью процедуры измерений).

Зрительная труба **6**, выполненная по оптической схеме телескопа, является в то же время **автоколлиматором**. Автоколлиматор – это такая зрительная труба, которая позволяет контролировать перпендикулярность ее оптической оси по отношению к отражающей поверхности. Для выполнения этой задачи труба **6** содержит в своей фокальной плоскости совмещенное с ее оптической осью и освещенное сбоку перекрестие нитей **10** (конструкция окуляра с крестом нитей и осветителем называется **окуляром Гаусса**). Перекрестие **10** может одновременно наблюдаться глазом – как прямо через окуляр, так и в отраженном свете (при двойном проходе вперед-назад через объектив) – после отражения от какой-либо (плоской) поверхности, расположенной перед объективом. В нашем случае этой поверхностью будет одна из граней призмы **9**. При этом, если оптическая ось трубы **6** (автоколлиматора) перпендикулярна к внешней отражающей поверхности, то два изображения перекрестия **10** совмещаются друг с другом. Если же условие перпендикулярности не соблюдено, то и в этом случае взаимное перемещение двух изображений перекрестия **10** в процессе юстировки позволяет визуальным образом контролировать свои действия.

Коллиматор отличается от зрительной трубы тем, что в фокальной плоскости его объектива размещена щель **11**, регулируемая по ширине при помощи микрометрического винта **12**.

Неподвижное основание гониометра снабжено угломерным лимбом **13**, а поворотные детали – отсчетными устройствами **14,15**, отсчет углов по которым производится с использованием принципа нониуса. Для повышения точности отсчета угла (устранения ошибки из-за неточного совмещения центра шкалы лимба с осью вращения), **как правило**, каждая

поворотная деталь гониометра снабжается двумя одинаковыми отсчетными устройствами по разные стороны лимба, причем правильное значение угла получается как среднее арифметическое из двух показаний. Заметим, что серьезное отношение к измерениям, подразумевающее получение данных с наибольшей возможной точностью, **заведомо предполагает снятие показаний с обоих отсчетных устройств**, независимо от того, кажутся или нет их показания идентичными при поверхностном взгляде.

Для исследования дисперсии установка содержит источник света с линейчатым спектром – газоразрядную ртутную лампу *16*, расположенную перед входным отверстием коллиматора. Питание лампы осуществляется от сети 220 В через дроссель *17*, обеспечивающий устойчивость горения разряда.

### **Меры безопасности при работе с установкой**

- 1) Перед началом работы проверьте, чтобы цепь питания ртутной газоразрядной лампы нигде не имела видимых повреждений изоляции. При обнаружении таких повреждений сообщите о них преподавателю или лаборанту и приступайте к работе только после их устранения.
- 2) Открытая газоразрядная лампа представляет опасность для зрения, так как является источником ультрафиолетового излучения. Поэтому следите, чтобы окошки защитного кожуха лампы были полностью заслонены коллиматорами приборов, т.е. чтобы прямое излучение лампы не проникало в помещение лаборатории. В то же время излучение, прошедшее оптическую схему, такой опасности для зрения не представляет, поскольку его ультрафиолетовая составляющая хорошо поглощается оптическим стеклом.

В Табл.1 приведен перечень доступных наблюдению спектральных линий излучения ртутной лампы.

Таблица 1.

Цвет линии (условно на глаз)	Интенсивность линии (усл. на глаз)	Длина волны в воздухе, нм
фиолетовая	средняя	404.7
фиолетовая	очень слабая	407.8
синяя	сильная	435.8
голубая	слабая	491.6
зеленая	сильная	545.1
желтая	сильная	577.0
желтая	сильная	579.1
оранжевая	слабая	615.2
оранжевая	слабая	623.2

### **Примечание!**

В связи с тем, что мы в данной работе исследуем дисперсию света, **следует сразу запомнить, что в спектроскопии всякое упоминание о длине волны без указания – в какой среде, лишено смысла, поскольку длина волны (в отличие от частоты колебаний в электромагнитной волне) существенно зависит от показателя преломления среды.**

В Табл.1 длины волн приводятся для воздуха. В спектроскопических таблицах в литературе длины волн обычно даются для вакуума, однако полезно перед использованием литературными данными специально уточнять это обстоятельство. Довольно часто в литературе приводятся не длины волн, а **частоты** спектральных линий, – точнее, их волновые числа в вакууме (в западной литературе все равно называемые «частотами»), причем выражаются они в единицах «обратный сантиметр» и, следовательно, соответствуют числу длин волн в 1 см вакуума.

Приблизительный пересчет от длины волны в воздухе к длине волны в вакууме может быть выполнен с использованием значения показателя преломления воздуха при нормальных условиях (давление воздуха 760 Торр, температура +20°C, относительная влажность воздуха 60%), равного

$$n_{\text{возд}}^{(norm)} = 1.0002727$$

Например, длине волны в таком воздухе 623.2 нм соответствует значение длины волны в вакууме 623.4 нм.

В то же время учитывать отличие показателя преломления воздуха от единицы в выражении (6) при нашем уровне точности измерений, разумеется, нет никакой нужды.

## 4. Порядок работы.

По согласованию с преподавателем или лаборантом включите разряд в ртутной лампе.

### Предупреждения:

- 1) После включения разряда до начала измерений должно пройти 5–10 минут, чтобы давление паров ртути поднялось (за счет прогрева колбы разрядом) до стационарного уровня, обеспечивающего достаточно высокую интенсивность излучения.
- 2) При коротких перерывах в работе **не следует выключать разряд**, поскольку при данной конструкции лампы повторное включение разряда станет возможно лишь после остывания колбы, т.е. через довольно длительное время.

### **Юстировка гониометра.**

Сфокусируйте зрительную трубу и коллиматор. Добейтесь перпендикулярности оптической оси зрительной трубы по отношению к оси гониометра. Добейтесь также наиболее полного заполнения объектива коллиматора светом лампы. **Приемы юстировки из [1] подробнее описаны в Приложении 3.**

При помощи микрометрического винта, укрепленного на корпусе коллиматора, установите **нормальную** ширину щели коллиматора. В спектроскопии **нормальной** называется такая ширина щели спектрального прибора, при которой ширина изображения щели не превышает того ее значения, которое обусловлено только действием дифракции излучения на апертуре призмы, а яркость изображения максимальна. Уменьшение ширины щели менее нормальной нецелесообразно, т.к. оно вызывает лишь уменьшение светового потока, но не ведет к дальнейшему уменьшению ширины изображения. Увеличение ширины щели по сравнению с нормальной непосредственно ведет к увеличению угловой ширины изображения щели и, следовательно, уменьшению точности измерений. Для установления нормальной ширины щели поступите следующим образом:

- установите первоначально очень малую ширину щели;
- плавно увеличивайте ширину щели до тех пор, пока ширина изображения щели, видимая в зрительную трубу, также не начнет увеличиваться.

Установите на столике призму и при помощи итерационной процедуры (**приемы юстировки из [1] см. в Приложении 3**) добейтесь параллельности граней призмы по отношению к оси гониометра.

Устанавливая ось зрительной трубы по нормали к каждой из трех граней призмы, измерьте углы призмы, пользуясь лимбами гониометра. *Не забывайте о необходимости усреднять показания по двум отсчетным приспособлениям.* Проверьте правильность измерений углов между гранями призмы с использованием теоремы о сумме углов треугольника.

Измерьте углы наименьшего отклонения для каждой из спектральных линий ртути. Для этого:

- Откройте шторку между лампой и щелью коллиматора.
- Вращая столик с призмой, воспроизведите такой ход лучей через призму, который приблизительно соответствует изображенному на **Рис.1**.
- Вращая зрительную трубу, поставьте ее в такое положение, в котором видны цветные изображения линий, полученные преломлением световых пучков в призме. Убедитесь, что вид спектра на глаз соответствует его словесному описанию в **Табл.1**.
- Держа в поле зрения всю совокупность линий, медленно поворачивайте столик с призмой в небольших пределах и наблюдайте в зрительную трубу смещение изображений линий в поле зрения, в том числе прохождение их через положение минимального отклонения;
- Выбрав спектральную линию (записав ее длину волны в свою таблицу измерений), установите ее изображение в положение минимального отклонения; затем наведите крест нитей зрительной трубы на центр изображения линии и снимите угловой отсчет по лимбам гониометра.

Удалите призму со столика и снимите угловые отсчеты для изображения исходного неотклоненного пучка.

Для вычисления показателя преломления воспользуйтесь уравнением (6). Используя данные из **Табл.1**, постройте график зависимости показателя преломления от длины волны, который и является результатом данной работы.

### **Литература.**

[1]. В.А.Соловьев, В.Е.Яхонтова. Руководство к лабораторным работам по физике: Учеб.пособие. – СПб, Изд.СПб Университета, 1997. Изд.2-е. – 340 с., ил.

### **Приложение 1.**

Аналитическое доказательство минимальности углового отклонения при симметричном ходе лучей.

Из выражения (3) очевидно, что при повороте призмы внутренние углы  $r_1, i_2$  приобретут равные по абсолютной величине, но обратные по знаку приращения. Введем *новую независимую переменную*  $\Psi$  – приращение внутреннего угла. Подчеркнем для ясности, что мы вовсе не предполагаем угол  $\Psi$  малой величиной. Тогда

$$r_1 = \frac{\alpha}{2} + \Psi, \quad i_2 = \frac{\alpha}{2} - \Psi \quad (\text{П1.1})$$

и, дифференцируя левые и правые части уравнений (1) и (2) по  $\Psi$ , получим:

$$\frac{di_1}{d\Psi} \cos(i_1) = n \frac{dr_1}{d\Psi} \cos(r_1) = n \cos\left(\frac{\alpha}{2} + \Psi\right), \quad (\text{П1.2})$$

$$\frac{dr_2}{d\Psi} \cos(r_2) = n \frac{di_2}{d\Psi} \cos(i_2) = -n \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \Psi\right). \quad (\text{П1.3})$$

Теперь, пользуясь для  $\cos(i_1)$ ,  $\cos(r_2)$  теоремой Пифагора и перенося полученные выражения в правую часть (опускаем длинные выкладки), получим:

$$\frac{di_1}{d\Psi} = \frac{n \cos\left(\frac{\alpha}{2} + \Psi\right)}{\sqrt{1 - \left(n \sin\left(\frac{\alpha}{2} + \Psi\right)\right)^2}}; \quad \frac{dr_2}{d\Psi} = \frac{-n \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \Psi\right)}{\sqrt{1 - \left(n \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \Psi\right)\right)^2}}. \quad (\text{П1.4})$$

Выражения (П1.4) могут быть дополнительно упрощены:

$$\frac{di_1}{d\Psi} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{n^2 - 1}{n^2 \cos^2\left(\frac{\alpha}{2} + \Psi\right)}}}; \quad \frac{dr_2}{d\Psi} = \frac{-1}{\sqrt{1 - \frac{n^2 - 1}{n^2 \cos^2\left(\frac{\alpha}{2} - \Psi\right)}}}. \quad (\text{П1.5})$$

Заметим, что эти два выражения отличаются друг от друга по абсолютной величине *только* знаком перед  $\Psi$  в знаменателях.

Из полученных выражений (П1.5) видно, что, как и следовало ожидать, приращения углов  $i_1, r_2$

- 1) имеют разный знак;
- 2) они равны по абсолютной величине при  $\Psi = 0$ , но зависят от  $\Psi$ ;



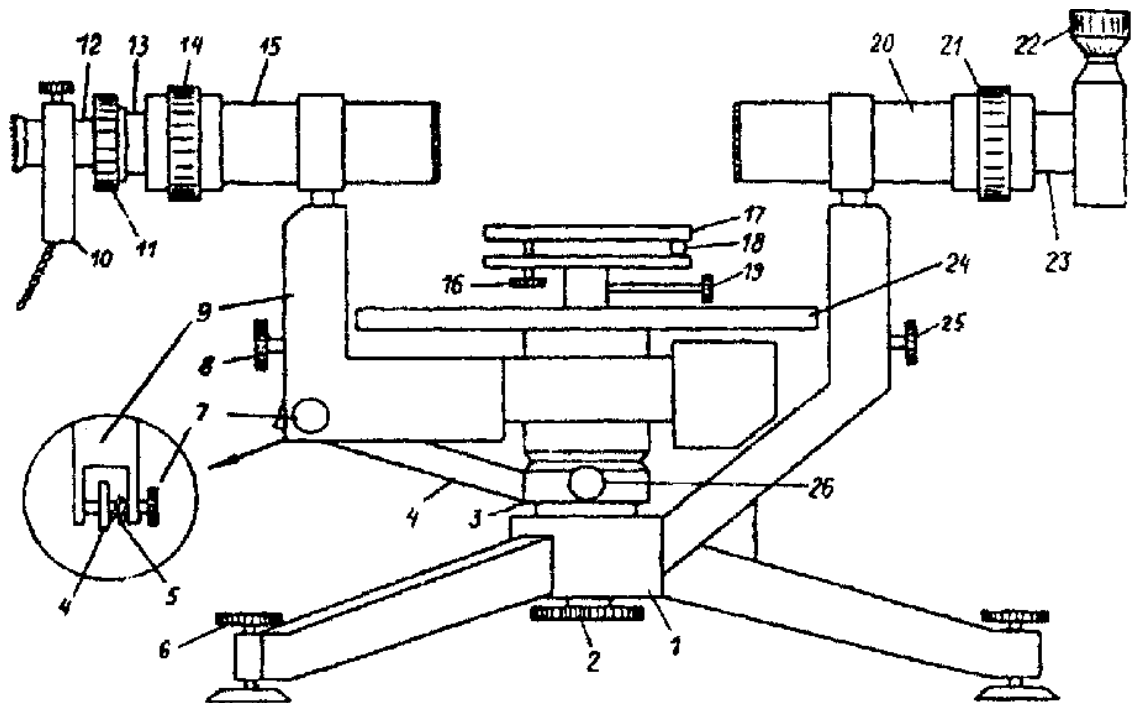
- 3) при отклонении  $\Psi$  от нуля (положительная) скорость изменения  $i_1$  всюду возрастает по абсолютной величине, а (отрицательная) скорость изменения  $i_2$  убывает по абсолютной величине.

Таким образом, при изменении  $\Psi$  угол  $i_1$  в каждой точке растет быстрее, чем убывает угол  $i_2$ . Это и означает (см. **Рис.1**), что симметричный ход лучей соответствует углу минимального отклонения.

## Приложение 2.

### Устройство спектрогониометра.

Чертеж спектрогониометра ([1], стр.104) приведен на **Рис.3**.



**Рис.3.** Конструкция спектрогониометра

К массивной металлической треноге **1** привинчена вертикальная колонка, на которой смонтированы все основные детали гониометра: зрительная труба **15**, лимб **24** для отсчета углов поворота трубы, столик **17** для установки призм, дифракционных решеток и т.д., коллиматор **20** для создания параллельного пучка лучей. Точно обработанные цилиндрические поверхности снаружи и внутри колонки задают общую вертикальную ось вращения для всех деталей гониометра, поворотом которых задаются измеряемые углы. Зрительная труба смонтирована на кронштейне **9**, который может свободно поворачиваться вокруг общей оси гониометра. Грубо труба устанавливается в нужном направлении рукой (поворачивать можно только за кронштейн, а не за трубу). Плавный поворот трубы в небольших пределах производится винтом **7**, проходящим через резьбовое отверстие в поводке **4**, укрепленном на кольце **3**. Конец винта упирается в одну из щек коробчатого кронштейна **9**, а пружина **5**, вставленная между поводком и другой щекой кронштейна, прижимает кронштейн к повод-

ку. Если кольцо зажать винтом **26**, то при вращении винта **7** кронштейн с трубой поворачивается. При отпущенном винте **26** кольцо свободно вращается вокруг оси гониометра, не мешая грубой наводке трубы <sup>\*</sup>). Углы поворота трубы отсчитывают по лимбу с помощью двух нониусов. Винт **8** позволяет изменять наклон трубы и устанавливать ее оптическую ось перпендикулярно оси вращения (у некоторых гониометров труба в целом не наклоняется, а перемещается крест нитей окуляра, фиксирующий направление оптической оси). Точно так же винт **25** позволяет изменять наклон оптической оси коллиматора.

Зрительная труба гониометра представляет собой отсчетную трубу с автоколлимационным окуляром Гаусса. Возможность фокусировки трубы обеспечивается перемещением тубусов (**13** и **12**), в которых смонтированы крест нитей и собственно окуляр. Тубус креста **13** грубо перемещается рукой, а для тонкой наводки служит гайка **14**. Тубус окуляра **12** перемещается гайкой **11**. В кожухе **10** смонтирована лампочка, освещающая пластинку в окуляре Гаусса. Положение лампочки можно регулировать, отпуская зажимной винт кожуха.

Столик **17** укреплен на стержне, вставленном в трубчатую ось, проходящую в канал колонки гониометра. Столик можно поднимать и опускать винтом **2**, а также поворачивать вокруг общей оси гониометра, фиксируя угол поворота винтом **19**. Наклон столика можно изменять с помощью двух регулировочных винтов **16**. Третья точка его опоры (шарик **18**) фиксирована. Столик прижимается к винтам и шарик пружинами, которые на рисунке не показаны. На столик гониометра ставится исследуемый прибор (например, призма или дифракционная решетка), который нужно осветить параллельным пучком лучей. Для создания такого пучка служит коллиматор.

Коллиматор представляет собой трубу, на одном конце которой на выдвижном тубусе **23** помещается узкая щель, а на другом – объектив, превращающий расходящийся пучок лучей от каждой точки щели в параллельный. Фокусировка коллиматора осуществляется перемещением тубуса **23**; для плавной регулировки служит гайка **21**. Ширину щели можно изменять с помощью микрометрического винта **22**. Поворот барабана винта на одно деление изменяет ширину щели на 0.01 мм.

### **Приложение 3.**

#### **Методика юстировки гониометра**

( [1], стр.55-56, 106-109 )

**Фокусировка и установка трубы.** В гониометре труба должна быть сфокусирована на бесконечность и установлена так, чтобы ее оптическая ось была строго перпендикулярна оси гониометра (т.е. оси вращения трубы и столика). Для фокусировки трубы можно было бы навести ее на какой-либо удаленный предмет, но трубу с автоколлимационным окуляром Гаусса лучше фокусировать при автоколлимационном ходе лучей. Для фокусировки и установки трубы используют плоскопараллельную пластинку с хорошо отражающими (полированными) гранями. Пластинку устанавливают на столике гониометра.

Порядок операций следующий. Прежде всего фокусируют окуляр трубы на крест нитей. После этого освещают крест лампой через боковое отверстие окуляра; лампу нужно утаивать так, чтобы свет, отраженный от полупрозрачной пластинки, был направлен по оси трубы (правильность установки лампы можно проверить, глядя в трубу со стороны объектива). Плоскопараллельную стеклянную пластинку устанавливают на столике так, чтобы ее плоскость была приблизительно перпендикулярна оси трубы, тогда в трубу можно будет видеть пятно отраженного от пластинки света. (Если труба имеет большое увеличение, то при установке отражающей поверхности на глаз отраженный свет обычно не попадает в поле зрения; однако небольшими поворотами и наклонами столика нетрудно найти нужное положение этой поверхности.) После этого находят такое положение объектива (вдвигая или выдвигая тубус), при котором изображение креста нитей в отраженном свете будет резко видно. Затем, поворачивая и наклоняя столик, добиваются совпадения креста нитей с его изображением (при этом, если труба не перпендикулярна оси, то и пластинка

<sup>\*</sup>) Встречаются и другие, хотя в общем, сходные, механизмы тонкой наводки

оказывается непараллельной оси столика). После этого столик поворачивают на  $180^\circ$ . Очевидно, что после поворота пластинка уже не будет перпендикулярна оси трубы и крест нитей уже не будет совпадать со своим изображением. Изменив наклон трубы, уничтожают *половину* расхождения между положениями креста и его изображения; вторую же половину расхождения уничтожают, изменяя наклон столика. Затем вновь поворачивают столик на  $180^\circ$  и так поступают до тех пор, пока поворот столика не перестанет вызывать расхождение между положениями креста и его изображения. Тогда плоскость пластинки будет параллельна оси столика, а ось трубы – перпендикулярна ей.

**Освещение и фокусировка коллиматора.** Для освещения щели коллиматора следует направить его на источник света, перемещая треногу гониометра и регулируя ее высоту и наклон установочными винтами-ножками. Оптическая ось коллиматора должна быть направлена в центр источника света, и весь объектив коллиматора должен быть заполнен светом. Это можно проверить, поместив у объектива коллиматора лист бумаги. Осветив щель, наблюдают ее изображение в предварительно (см. предыдущий пункт) сфокусированную на бесконечность зрительную трубу (коллиматор и зрительная труба должны быть установлены объективами "навстречу" друг другу). Вдвигая и выдвигая тубус объектива коллиматора (но не зрительной трубы!), добиваются максимальной резкости изображения щели. Окончательная установка проверяется по отсутствию параллакса (движения изображения при перемещении зрачка глаза относительно окуляра зрительной трубы).

**Установка коллиматора.** Оптическая ось коллиматора устанавливается перпендикулярно оси гониометра так, чтобы изображение щели симметрично располагалось в поле зрения правильно установленной зрительной трубы. При высокой щели, изображение которой не помещается в поле зрения трубы, эту установку трудно выполнить с большой точностью. Для облегчения задачи поперек щели натянута нить, изображение которой следует совместить с центром креста нитей трубы.

После установки коллиматора следует еще раз проверить заполнение его объектива светом и, если нужно, исправить наклон коллиматора.

**Установка призмы.** Призму ставят на столик гониометра так, чтобы обе преломляющие грани были параллельны оси вращения. Для этого наводят трубу с автоколлимационным окуляром поочередно на эти грани и, действуя регулировочными винтами столика, устанавливают каждую из них перпендикулярно оптической оси трубы (которая, конечно, должна быть уже установлена перпендикулярно оси гониометра).

Призму нужно расположить на столике так, чтобы, установив одну из граней, в дальнейшем не изменять ее наклона при установке положения второй грани. Для этого одна из осей вращения столика (соответствующая индивидуальному действию одного из юстировочных винтов столика) должна быть приблизительно перпендикулярна той из граней призмы, которую предполагается съюстировать первой. В этом случае юстировка второй грани почти не окажет действия на положение первой грани. Учитывая, что полной независимости юстировок двух граней все же достигнуть не удастся, необходимо несколько раз повторить попеременную подъюстировку обеих граней, следя за постепенным уменьшением ошибок их установки.