



УДК 53.37.016; 53.072; 53.004; 53. 681.3 (076.5)

ББК 22.3:32.81 Я73

**Ревинская Ольга Геннадьевна**

кандидат педагогических наук,

профессор

кафедра теоретической и экспериментальной физики

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Томск

**Кравченко Надежда Степановна**

кандидат физико-математических наук,

доцент

кафедра теоретической и экспериментальной физики

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Томск

**Revinskaya Olga Gennadievna**

Candidate of Pedagogics,

Professor

Chair of Theoretical and Experimental Physics

National Research Tomsk Polytechnic University

Tomsk

**Kravchenko Nadezhda Stepanovna**

Candidate of Physics and Mathematics,

Assistant Professor

Chair of Theoretical and Experimental Physics

National Research Tomsk Polytechnic University

Tomsk

**О возможностях модернизации методики изучения нормальной дисперсии света с помощью треугольной призмы в курсе общей физики**

**On the Possibilities of Upgrading Methods for Studying the Normal Light Dispersion Through a Triangular Prism in the General Physics Course**

В статье анализируется традиционный для курса общей физики подход к изучению нормальной дисперсии света с помощью гониометра и треугольной призмы. Предложенные направления модернизации традиционной методики реализованы в виде компьютерной лабораторной работы. Даны рекомендации по использованию данной методики в лабораторном практикуме курса общей физики.

The article analyzes the traditional approach to the General Physics course for studying the normal light dispersion using the goniometer and a triangular prism. The offered directions of traditional teaching methods modernization are realized in the form of computer laboratory work. Recommendations for using the given methods in a laboratory practical work of the General Physics course are made.

**Ключевые слова:** методика преподавания физики в вузе, нормальная дисперсия света, физическая модель, компьютерные инструменты в образовании.

**Key words:** Physics teaching methods at a higher school, normal light dispersion, physical model, computer tools in education.

### **Введение**

Дисперсия света в курсе общей физики объясняется на основе волновых свойств света, взаимодействующего с веществом [1-3], и характеризует изменение показателя преломления вещества от длины волны света. Учитывая важность этого вопроса в формировании представлений о физической картине мира, нормальную дисперсию изучают не только теоретически, но и экспериментально в рамках лабораторного практикума. Традиционно для изучения нормальной дисперсии света в лабораторном практикуме курса общей физики используются треугольная призма и гониометр. Гониометр позволяет измерять угол между двумя лучами, проходящими через центр предметного столика. Ось симметрии равнобедренной треугольной призмы совмещают с центром предметного столика. Геометрическое продолжение падающего и вышедшего из призмы лучей будут пересекаться на оси симметрии призмы, а, следовательно, в центре предметного столика, только в случае симметричного хода лучей через призму (когда углы наклона падающего и вышедшего из призмы лучей по отношению к соответствующим граням призмы одинаковы). Если ход лучей через призму несимметричный, то лучи пересекаются в точке, отличной от центра предметного столика – измерения в этих условиях проводить нельзя. Исходя из этих особенностей устройства прибора, рабочие формулы для расчета показателя преломления обычно выводятся для симметричного хода лучей.

Если на призму падает немонахроматический свет, то на шкале гониометра наблюдают спектр (дискретный или непрерывный, в зависимости от типа источника). В зависимости от угла падения света на призму ширина спектра может быть различной. Когда для света, длина волны которого соответствует середине спектра, наблюдается симметричный ход лучей, ширина спектра будет минимальной. Чем дальше угол падения света на призму от симметричного хода лучей, тем шире спектр. Если основной задачей выполнения лабораторной работы считать выявление различий в показателе преломления света для различных длин волн (дисперсии), то предпочтительной следовало бы считать методику измерений, при которой угол отклонения света



для разных длин волн отличался бы как можно больше, то есть наблюдаемый спектр был бы как можно шире. Это позволило бы уменьшить относительную погрешность измерений. Напротив традиционная методика вынуждает проводить измерения в условиях, когда ход лучей симметричный, а ширина спектра минимальна.

Кроме того, чтобы добиться симметричного хода лучей через призму экспериментатор должен иметь определенные критерии. В качестве критерия рассматривают угол между падающим лучом и лучом, вышедшим из призмы (угол отклонения луча света от первоначального направления). В теории доказывалось, что для монохроматического света этот угол при симметричном ходе лучей также будет минимальным. Однако, как ведет себя угол отклонения луча света от первоначального направления при приближении к минимуму и при существенно несимметричном ходе лучей не обсуждается. Этот вопрос можно было бы изучить, выполнив измерения для несимметричного хода лучей через призму. Это позволило бы, в частности, объяснить, почему угол между падающим и вышедшим лучами вблизи минимума не изменяется в некоторых пределах. Студенты, изучающие курс общей физики, не имеют опыта исследования угла отклонения света, прошедшего через треугольную призму, и, учитывая существующую методику измерений, на гониометре выполнить эти исследования не представляется возможным. Для этого необходим другой прибор и постановка эксперимента. Знания, полученные в результате такого исследования, послужили бы обоснованием методики измерений на гониометре и позволили бы студентам осознано и эффективно пользоваться предлагаемым им критерием, от реализации которого полностью зависит выполнение экспериментов с использованием гониометра. Поэтому перед выполнением лабораторной работы по изучению нормальной дисперсии света с использованием гониометра необходимо выполнить исследования, не ограничивающиеся симметричным ходом луча света через призму.

Рассмотрим физические основания для такого исследования и их методическую ценность для изучения законов линейной оптики и нормальной дисперсии света.

## Несимметричный ход лучей через треугольную призму

Законы линейной оптики хорошо описывают ход луча монохроматического света через треугольную призму, но в большинстве учебников при рассмотрении данного вопроса ограничиваются симметричным ходом лучей.

Рассмотрим равнобедренную треугольную призму, проходя через которую луч монохроматического света преломляется дважды (рис. 1) при переходе из вакуума в среду с показателем преломления  $n$ , и обратно. Угол  $\delta$  между гранями призмы, на которых свет преломляется, называется преломляющим углом призмы.

Пусть луч света падает на левую грань призмы под углом  $\alpha_1$  к нормали. Согласно закону преломления луч света внутри призмы будет направлен под углом  $\beta_1$  к нормали левой грани и соответственно под углом  $\beta_2$  к

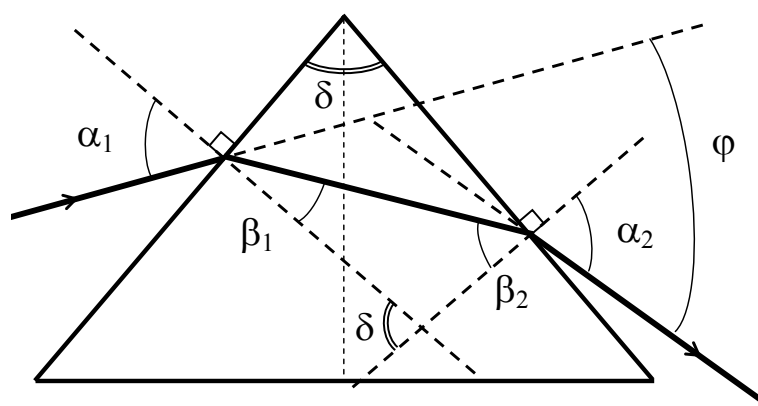


Рис. 1

нормали правой грани. После преломления на правой грани луч выйдет из призмы под углом  $\alpha_2$  к нормали правой грани. Тогда согласно закону преломления света

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = n \quad \text{и} \quad \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = n.$$

Для практических измерений удобно выразить показатель преломления  $n$  через внешние углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (угол, под которым луч света падает на призму, и угол, под которым луч света выходит из нее), исключив углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Для этого необходимо выполнить ряд тригонометрических преобразований. Из треугольника, образованного лучом света и нормалью к правой и левой граням, видно, что

$$\beta_1 + \beta_2 = \delta.$$

Тогда, например,

$$\beta_2 = \delta - \beta_1.$$



Из закона преломления света на правой и левой гранях призмы

$$n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} \text{ следует } \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1}.$$

Используя тождество  $\sin \beta_2 = \sin(\delta - \beta_1) = \sin \delta \cos \beta_1 - \cos \delta \sin \beta_1$ , получим

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} = \frac{\sin \delta \cos \beta_1 - \cos \delta \sin \beta_1}{\sin \beta_1} = \sin \delta \operatorname{ctg} \beta_1 - \cos \delta$$

и выразим из полученной формулы  $\operatorname{ctg} \beta_1$ :

$$\operatorname{ctg} \beta_1 = \frac{\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1 \cos \delta}{\sin \alpha_1 \sin \delta}.$$

Из закона преломления света на левой грани  $n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1}$  можно получить

следующее выражение для показателя преломления

$$n^2 = \frac{\sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_2 + 2 \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \delta}{\sin^2 \delta}$$

$$\text{или } \sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_2 + 2 \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \delta = n^2 \sin^2 \delta.$$

Данная формула связывает показатель преломления  $n$  с углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (углы под которыми луч света падает на призму и выходит из нее) как при симметричном ходе лучей, так и при несимметричном. При симметричном ходе лучей ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ) выражение для показателя преломления существенно упрощается, но теряется основа для анализа.

На основе полученного выражения проанализируем, как отклонение луча света, прошедшего через призму, зависит от преломляющего угла призмы и разности между углами наклона падающего и вышедшего лучей.

### **Зависимость угла отклонения луча света $\varphi$ от преломляющего угла призмы $\delta$**

Сначала проанализируем, как угол  $\alpha_2$ , под которым свет выходит из призмы, зависит от преломляющего угла призмы  $\delta$ . Для этого из полученной ранее формулы выразим  $\sin \alpha_2$  в виде

$$\sin \alpha_2 = \sin \delta \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1} - \sin \alpha_1 \cos \delta.$$

Из физического смысла показателя преломления  $n$  следует, что для всех сред (кроме вакуума)  $n > 1$ .

Выражение в правой части по модулю должно быть не больше единицы (т.к. по определению  $|\sin \alpha_2| \leq 1$ ), тогда луч пройдет через призму. Если величина  $\sin \delta \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1} - \sin \alpha_1 \cos \delta$  по модулю больше единицы, то луч света не может выйти из призмы. Это математическое представление такого физического явления как полное внутреннее отражение (преломление света на правой грани призмы не наблюдается).

В условиях, когда полное внутреннее отражение НЕ наблюдается, проанализируем как угол  $\alpha_2$ , под которым луч выходит через правую грань призмы, зависит от преломляющего угла призмы  $\delta$  при постоянном угле  $\alpha_1$  падения света на левую грань призмы. Для упрощения анализа предположим, что все углы ( $\alpha_1, \alpha_2, \delta$ ) малы. Тогда можно считать, что

$$\sin \alpha_1 \approx \alpha_1, \sin \alpha_2 \approx \alpha_2, \sin \delta \approx \delta, \cos \delta \approx 1.$$

$$\text{В этом случае } \alpha_2 \approx \delta \sqrt{n^2 - \alpha_1^2} - \alpha_1.$$

Следовательно, чем больше преломляющий угол  $\delta$  призмы, тем больше угол  $\alpha_2$ , под которым луч света выходит из правой грани призмы (при  $\alpha_1 = \text{const}$ ). Качественно эта зависимость справедлива также и для больших углов, но носит очевидно нелинейный характер.

Введем угол  $\varphi$  между падающим лучом и лучом, вышедшим из призмы, который называют углом отклонения света от первоначального направления при прохождении через призму (рис. 1). Из геометрии нетрудно показать, что  $\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 - \delta$ . Отсюда  $\alpha_2 = \varphi + \delta - \alpha_1$ . Следовательно, для малых углов

$$\varphi \approx \delta \left( \sqrt{n^2 - \alpha_1^2} - 1 \right).$$

То есть чем больше преломляющий угол призмы  $\delta$ , тем сильнее луч монохроматического света отклоняется от первоначального направления при прохождении через призму (при одном и том же угле падения  $\alpha_1$ ).



### **Зависимость угла $\varphi$ отклонения света от разности между углами наклона падающего и вышедшего лучей**

Для дальнейшего анализа введем угол  $\Delta = \alpha_1 - \alpha_2$ , который показывает насколько отклонение от нормали падающего луча больше, чем у вышедшего. Например, для симметричного хода лучей  $\alpha_1 = \alpha_2$  угол  $\Delta = 0$ . Тогда из двух уравнений  $\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 - \delta$  и  $\Delta = \alpha_1 - \alpha_2$  выразим углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2}(\varphi + \delta + \Delta) \text{ и } \alpha_2 = \frac{1}{2}(\varphi + \delta - \Delta).$$

После тригонометрических преобразований полученное ранее выражение

$$\sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_2 + 2 \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \delta = n^2 \sin^2 \delta$$

можно записать в виде

$$1 - (\cos \Delta + \cos \delta) \cos(\varphi + \delta) + \cos \Delta \cos \delta = n^2 \sin^2 \delta.$$

Выразив  $\cos(\varphi + \delta)$ , получим

$$\cos(\varphi + \delta) = \frac{1 - n^2 \sin^2 \delta + \cos \Delta \cos \delta}{\cos \Delta + \cos \delta}.$$

Для упрощения анализа опять же рассмотрим случай малых углов. Тогда

$$\cos(\varphi + \delta) \approx 1 - \frac{(\varphi + \delta)^2}{2}, \quad \cos \Delta \approx 1 - \frac{\Delta^2}{2}, \quad \cos \delta \approx 1 - \frac{\delta^2}{2}, \quad \sin \delta \approx \delta.$$

Подставив и приведя подобные, получим

$$(\varphi + \delta)^2 \approx \delta^2 \frac{4n^2 - \Delta^2}{4 - \Delta^2 - \delta^2} \text{ или } \varphi \approx \delta \left( \sqrt{\frac{4n^2 - \Delta^2}{4 - \Delta^2 - \delta^2}} - 1 \right).$$

(для малых углов очевидно, что  $4 - \Delta^2 - \delta^2 > 0$ , а  $4n^2 - \Delta^2 \neq 0$ )

Для фиксированной призмы ( $\delta = \text{const}$ ) угол отклонения  $\varphi$  луча света от первоначального направления зависит от разницы  $\Delta$  между падающим и вышедшим лучами нелинейно. Исследуем эту зависимость на экстремум. Для этого вычислим производную

$$\frac{d\varphi}{d\Delta} = \frac{\Delta \cdot \delta(4n^2 - 4 + \delta^2)}{(4n^2 - \Delta^2)^{1/2} (4 - \Delta^2 - \delta^2)^{3/2}}.$$

Величина  $4(n^2 - 1) + \delta^2 > 0$  всегда. Поэтому производная для отрицательных углов  $\Delta$  меньше нуля, для положительных – больше нуля, а при

$\Delta = 0$  – обращается в ноль. Следовательно, при  $\Delta = 0$  угол  $\varphi$  отклонения луча от первоначального направления имеет минимум.

Таким образом, при симметричном ходе лучей ( $\Delta = 0$ ) угол отклонения  $\varphi$  оказывается минимальным для света фиксированной длины волны. Качественно зависимость  $\varphi = \varphi(\Delta)$  справедлива также и для больших углов, но имеет более сложный характер.

### **Модель экспериментальной установки**

На основе проведенного расширенного анализа можно не только показать, что симметричному ходу лучей через призму соответствует минимальное отклонение луча монохроматического света от первоначального направления, но и предложить принципиальную схему соответствующих экспериментальных исследований. Эта принципиальная схема была реализована нами в виде лабораторной работы по изучению моделей физических процессов на компьютере «Дисперсия света», в которой студентам сначала предлагается исследовать и проанализировать зависимость угла отклонения луча монохроматического света при прохождении через треугольную призму от преломляющего угла призмы  $\varphi = \varphi(\delta)$  и разности между углами наклона падающего и вышедшего лучей  $\varphi = \varphi(\Delta)$ . На основании этих исследований выбирают оптимальные условия для изучения дисперсии света, при которых проводят соответствующие измерения зависимости показателя преломления от длины волны света  $n = n(\lambda)$ .



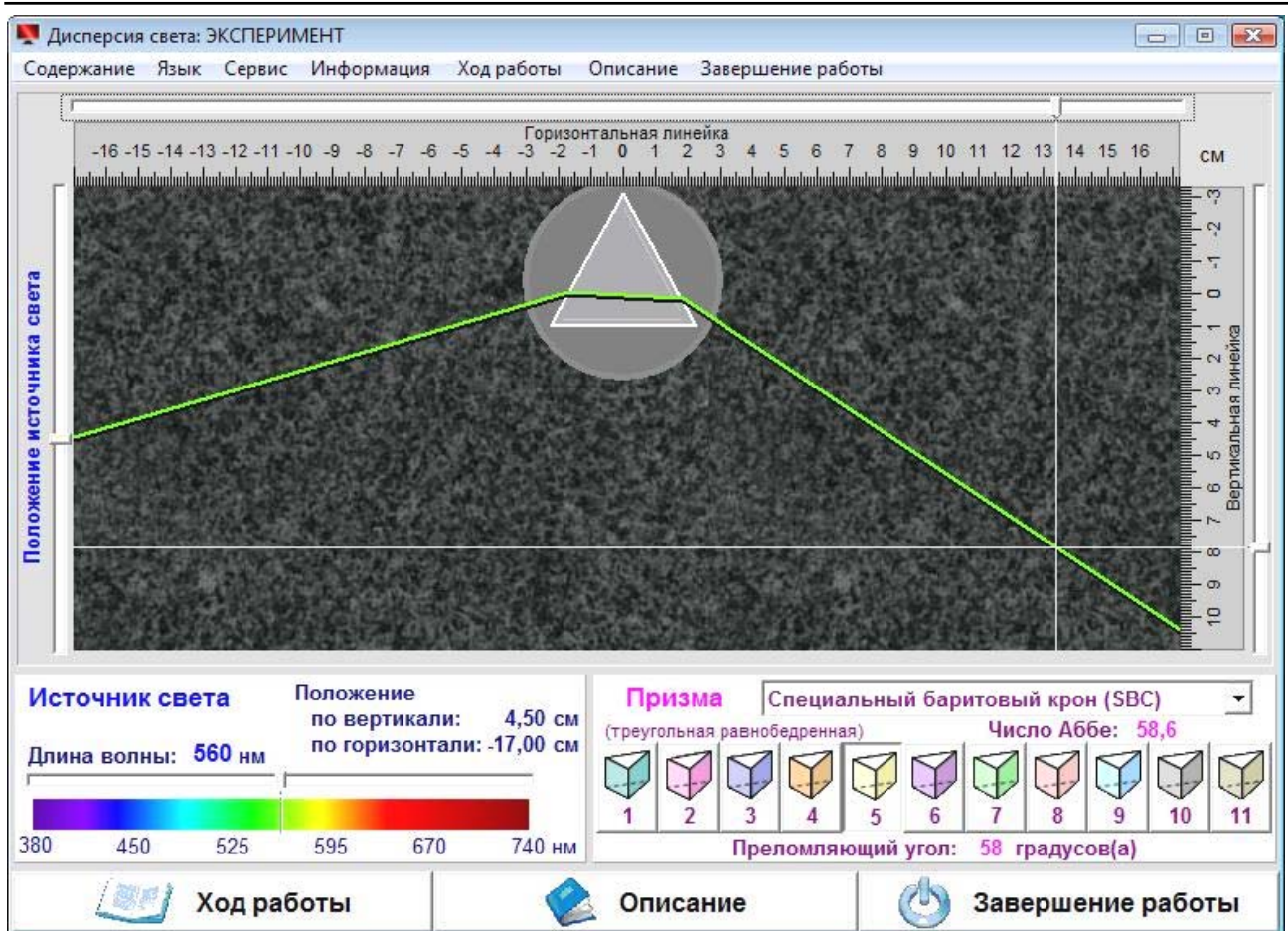


Рис. 2

В данной работе средствами компьютерной графики моделируется прохождение луча света фиксированной длины волны через треугольную равнобедренную призму (рис. 2). Источник света можно перемещать в вертикальном направлении. Длину волны света можно менять в видимом диапазоне от 380 нм до 740 нм с шагом 1 нм. Для измерения углов наклона падающего и вышедшего из призмы луча (а также угла отклонения луча света) определяют тангенс угла наклона каждого луча по отношению к горизонтали с использованием вертикальной и горизонтальной линейки, цена деления которых 1 мм. При указанных условиях можно наблюдать как симметричный, так и несимметричный ход лучей через призму, а также дисперсию ряда натуральных и искусственных оптических стекол.

Исследования в работе проводятся в несколько этапов. Вначале изучают зависимость угла отклонения луча света от преломляющего угла призмы  $\varphi = \varphi(\delta)$ , которую можно считать линейной только при малых углах. Чтобы в этом убедиться в работе исследования проводят для призм и с большими, и с малыми преломляющими углами. Пример результатов этого исследования

приведен на рисунке 3а для прохождения зеленого света (560 нм) через призмы из плавленого кварца. Для всех призм угол падения луча света составлял  $57^\circ$ .

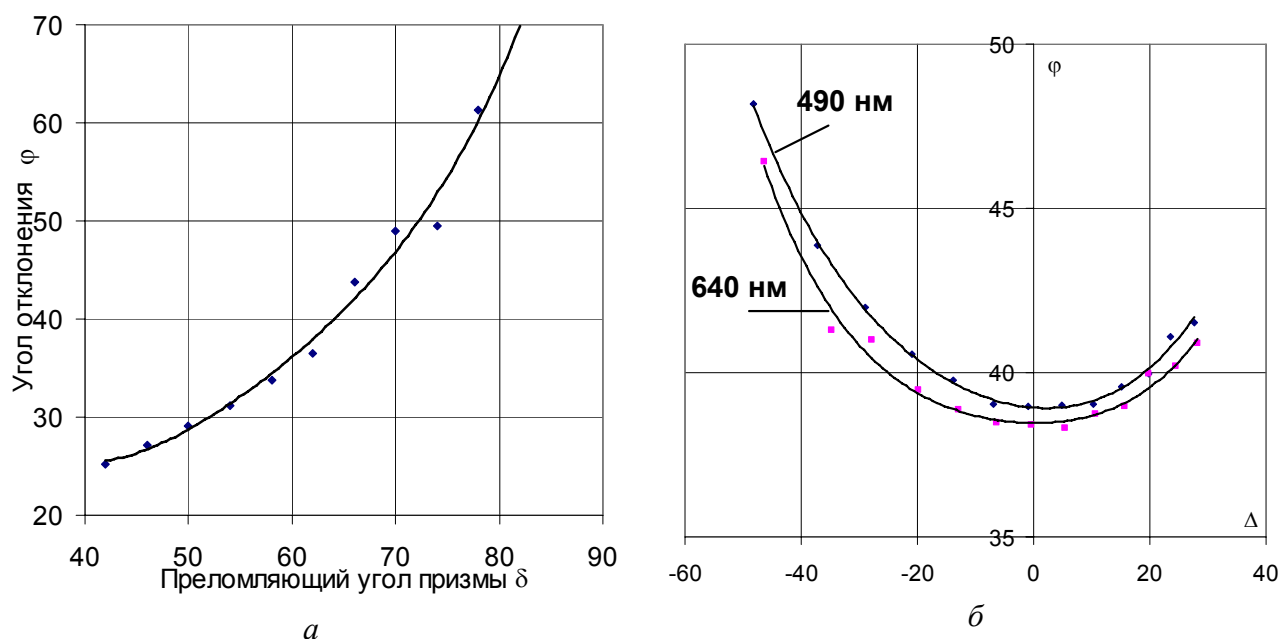


Рис. 3

На рисунке 3б приведены результаты исследования зависимости угла отклонения света от разности между углами наклона падающего и вышедшего лучей  $\varphi = \varphi(\Delta)$  для призмы из специального баритового крона с преломляющим углом  $50^\circ$  для голубого (490 нм) и красного света (640 нм). Полученные зависимости имеют довольно широкий минимум вблизи нуля (при симметричном ходе лучей), что и осложняет его экспериментальное обнаружение с помощью гониометра – при приближении к минимуму угол отклонения луча света от первоначального направления в некоторых пределах остается неизменным. Из проведенного исследования видно, что симметричный ход лучей соответствует середине диапазона, в пределах которого угол отклонения луча света от первоначального направления является неизменным и минимальным. Минимальные углы отклонения для света разной длины волны отличаются на малую величину. Это связано с тем, что дисперсия оптических стекол относится к тонким физическим эффектам и для ее обнаружения требуется особая тщательность выполнения экспериментов.

Эти исследования позволяют сделать вывод, что угол отклонения луча монохроматического света от первоначального света тем больше, чем больше



преломляющий угол призмы, и чем сильнее ход лучей через призму отличается от симметричного. Если изучение дисперсии света проводить в этих условиях, различия в углах отклонения для света различных длин волн будут наиболее существенными. Существенно отличающиеся величины наиболее удобны для экспериментальных измерений, особенно в учебной лаборатории. Поэтому эти условия будем считать оптимальными для экспериментального изучения нормальной дисперсии оптических стекол.

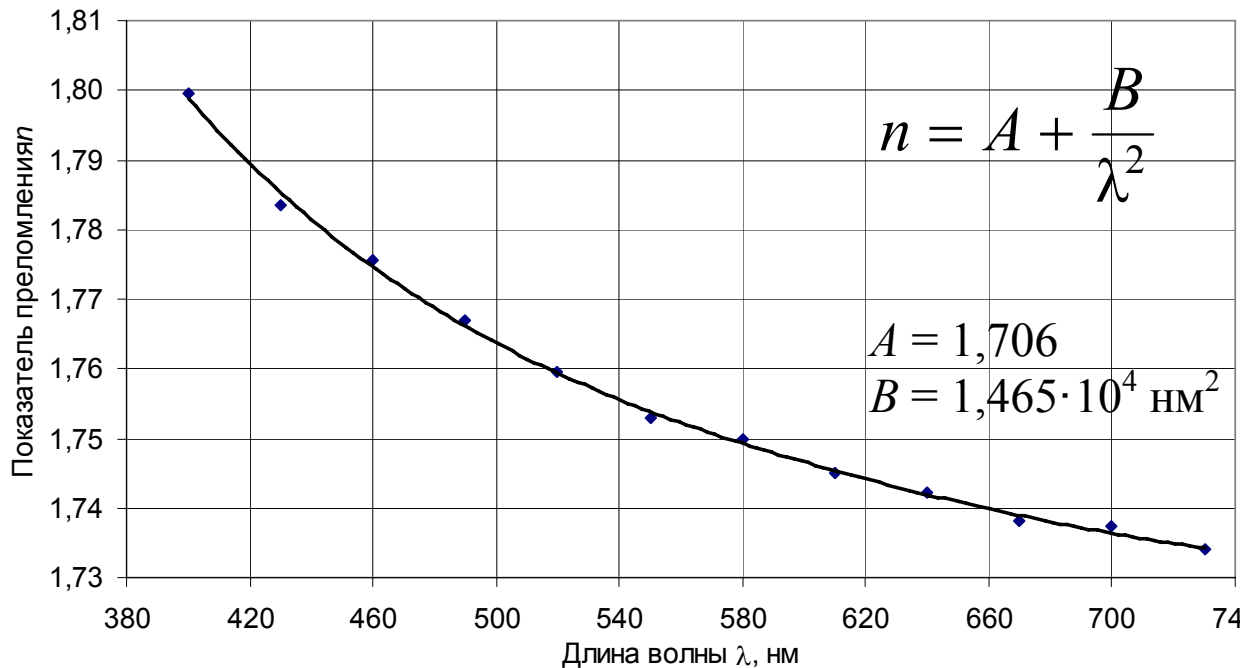


Рис. 4

Исходя из проведенного анализа особенностей прохождения света через призму, на последнем этапе выполнения работы для получения кривой дисперсии  $n = n(\lambda)$  проводят измерения при несимметричном ходе лучей через призму с достаточно большим преломляющим углом. На рисунке 4 приведен пример для призмы из двойного экстраплотного флинта. По полученным результатам с помощью метода наименьших квадратов рассчитывают числовые коэффициенты в формуле Коши вида:  $n = A + \frac{B}{\lambda^2}$ , а также коэффициент дисперсии (число Аббе). Благодаря выбору оптимальных условий изучения дисперсии расчетные значения числа Аббе для различных марок оптических стекол отличаются от табличных не более чем на 5–10%.

По мнению авторов, данная работа должна выполняться в комплексе с натурной лабораторной работой по изучению дисперсии света с помощью

гонометра. С методической точки зрения предложенный комплекс исследований теоретически и экспериментально обосновывает методику выполнения натурной работы, позволяет глубже понять принцип устройства прибора и постановки эксперимента, опосредовано частично снимает противоречие между задачей по исследованию дисперсии света и методикой измерений с помощью гониометра. Изучив и сравнив зависимость угла отклонения луча света от разности между углами наклона падающего и вышедшего луча для различных длин волн, студенты будут теоретически и морально подготовлены к тщательному выбору условий натурного эксперимента с использованием гониометра, обеспечивающим достоверность полученных ими экспериментальных данных (симметричного хода лучей через призму).

Сопоставив зависимость показателя преломления от длины волны на основе симметричного и несимметричного хода лучей через призму, студенты получают возможность сравнения результатов исследований, основанных на разных методиках, анализа причин погрешности экспериментальных данных. Такой подход позволяет избежать формального отношения к выполнению работ лабораторного практикума, развивает аналитические способности студентов при изучении физики.

### **Заключение**

Комплексное применение натуральных и компьютерных лабораторных работ по одной тематике позволяет показать глубину и разносторонность физических исследований вообще и учебного лабораторного практикума, как модели физических исследований. При этом компьютерные работы не должны воспроизводить натурную экспериментальную установку, а, напротив, должны предоставлять возможность рассмотреть иные аспекты изучаемого явления, недоступные по каким-то причинам для натурного исследования, но влияющие на понимание проблемы в целом. Это способствует формированию у студентов целостной физической картины мира, практическому применению их компьютерной грамотности, как при выполнении работы, так и при обработке результатов эксперимента. Описанная в данной статье лабораторная работа является составной частью комплекса лабораторных работ по изучению



моделей физических явлений и процессов на компьютере [4], который разрабатывается на кафедре теоретической и экспериментальной физики ТПУ с 2002 г.

#### **Библиографический список**

1. Сивухин Д.В. Оптика: Учеб. пособие – М.: Наука, – 1985. – 752 с.
2. Бутиков Е.И. Оптика: Учеб. пособие. – СПб.: Невский Диалект; БХВ-Петербург, – 2003. – 480 с.
3. Саржевский А.А. Оптика. Полный курс. – М.: Едиториал УРСС, – 2004. – 608 с.
4. O. G. Revinskaya, N. S. Kravchenko Studying of theoretical models of the physical phenomena and processes on the computer in a laboratory practical work // Journal of International Scientific Publication: Educational Alternatives, 2010. – Volum 8, Part 2. – PP. 51-59.

#### **Bibliography**

1. Butikov, E.I. Optics: Study Guide. – SPb.: Nevsky Dialect, BHV-Petersburg, – 2003. – 480 p.
2. Revinskaya, O. G., Kravchenko, N. S. Studying Theoretical Models of the Physical Phenomena and Processes on the Computer in a Laboratory Practical Work // Journal of International Scientific Publication: Educational Alternatives, 2010. – Volume 8, Part 2. – P. 51-59.
3. Sarzhevsky, A.A. Optics. Complete Course. – M: Editorial URSS, – 2004. – 608 p.
4. Sivukhin, D.V. Optics: Study Guide. – М.: Science, – 1985. – 752 p.