

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

Развитие методики изучения нормальной дисперсии света с помощью треугольной призмы в курсе общей физики

Ольга Геннадьевна Ревинская, Надежда Степановна Кравченко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ)
634034, г. Томск, пр. Ленина, 30; e-mail: ogr@tpu.ru

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.

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

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 [4–7]. Гониометр позволяет измерять угол между двумя лучами, пересекающимися на оси вращения предметного столика, проходящей через его центр. Равнобедренную треугольную призму на предметный столик гониометра устанавливают так, чтобы ось симметрии ее основания проходила через центр предметного столика. Геометрическое продолжение падающего и вышедшего из призмы лучей будут пересекаться на оси симметрии горизонтального сечения призмы, а, следовательно, над центром 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 точка пересечения лучей отклоняется от оси вращения предметного столика – измерения в этих условиях проводить нельзя. В связи с тем, что в лабораторных работах по изучению дисперсии с помощью данных приборов измерения выполняют только при симметричном ходе лучей через призму, в учебно-методическом сопровождении к этим работам рабочие формулы для расчетов показателя преломления

обычно выводятся только для симметричного хода лучей [4–6]. Из результатов, приведенных в статье [7], которые являются типичными для изучения дисперсии с помощью треугольной призмы и гониометра, видно, что изменение показателя преломления света в видимом диапазоне за счет дисперсии для стекла менее 1%, в то время как погрешность измерения показателя преломления для фиксированной длины волны составляет порядка 15-20%.

Если на призму падает некогерентный 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 проведения исследований с помощью треугольной призмы и гониометра 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 доказывается, 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 при несимметричном ходе 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, с помощью призмы и гониометра 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 точность экспериментов с использованием треугольной призмы и гониометра. Поэтому перед выполнением лабораторной работы по изучению нормальной дисперсии света с использованием треугольной призмы и 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 [1–3].

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 δ между гранями призмы, на которых свет преломляется, называется преломляющим углом призмы.

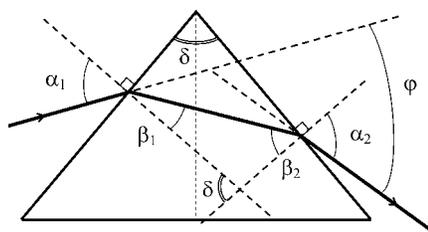


Рисунок 1. Ход лучей через треугольную призму (сечение, перпендикулярное граням призмы).

Пусть луч света падает на левую грань призмы под углом α_1 к нормали. Согласно закону преломления луч света внутри призмы будет направлен под углом β_1 к нормали левой грани и соответственно под углом β_2 к нормали правой грани. После преломления на правой грани луч выйдет из призмы под углом α_2 к нормали правой грани. Тогда согласно закону преломления света

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

Для практических измерений удобно выразить показатель преломления n через внешние углы α_1 и α_2 (угол, под которым луч света падает на призму, и угол, под которым луч света выходит из нее), исключив углы β_1 и β_2 . Для этого необходимо выполнить ряд тригонометрических преобразований. Из треугольника, образованного лучом света и нормальными 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 α_1 и α_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 φ от преломляющего угла призмы δ

Сначала проанализируем, как угол α_2 , под которым свет выходит из призмы, зависит от преломляющего угла призмы δ . 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 α_2 , под которым луч выходит через правую грань призмы, зависит от преломляющего угла призмы при постоянном угле α_1 падения света на левую грань призмы. Традиционно анализ этой зависимости ограничивается случаем, когда все углы малы. Для асимметричного хода лучей это приближение, как правило, не применимо. Поэтому для упрощения анализа выражения

$$\alpha_2 = \arcsin(\sin \delta \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1} - \sin \alpha_1 \cos \delta)$$

его правую часть разложим в ряд по δ

$$\alpha_2 \approx -\alpha_1 + \delta \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}}{(1 - \sin^2 \alpha_1)^{1/2}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(n^2 - 1) \sin \alpha_1}{(1 - \sin^2 \alpha_1)^{3/2}} \delta^2 + \\ + \frac{1}{6} \cdot \frac{(n^2 - 1)(2 \sin^2 \alpha_1 + 1) \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}}{(1 - \sin^2 \alpha_1)^{5/2}} \delta^3 - \dots$$

Зависимость угла α_2 , под которым луч света выходит из правой грани призмы, от преломляющего угла δ призмы (при $\alpha_1 = \text{const}$) представляет собой сходящийся знакопеременный ряд.

Введем угол φ 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 $\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 - \delta$. Следовательно, учитывая полученную зависимость $\alpha_2(\delta)$, получим

$$\varphi \approx \left(\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}}{(1 - \sin^2 \alpha_1)^{1/2}} - 1 \right) \delta - \frac{1}{2} \cdot \frac{(n^2 - 1) \sin \alpha_1}{(1 - \sin^2 \alpha_1)^{3/2}} \delta^2 + \\ + \frac{1}{6} \cdot \frac{(n^2 - 1)(2 \sin^2 \alpha_1 + 1) \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}}{(1 - \sin^2 \alpha_1)^{5/2}} \delta^3 - \dots$$

Зависимость $\varphi(\delta)$ также представляет собой сходящийся знакопеременный ряд и для призм с малыми преломляющими углами ($\delta \rightarrow 0$) носит линейный характер (ряд можно ограничить одним первым слагаемым). С увеличением преломляющего угла δ призмы зависимость $\varphi(\delta)$ продолжает оставаться монотонно возрастающей, но приобретает существенно нелинейный характер (при одном и том же угле падения α_1). Для средних значений (около 30°) преломляющих углов призм ряд можно ограничить тремя слагаемыми. Чтобы адекватно описывать зависимость $\varphi(\delta)$ для призм с большими преломляющими углами, ряд должен содержать большее количество слагаемых.

Зависимость угла φ 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 α_1 и α_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

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

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

Для упрощения анализа правую часть полученного выражения разложим в ряд по Δ :

$$\varphi \approx \frac{\pi}{2} - \delta - \arcsin \left(1 - \frac{n^2 \sin^2 \delta}{1 + \cos \delta} \right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{(n^2 - 1) \sin \delta}{n(1 + \cos \delta) \sqrt{2 - n^2 \sin^2 \delta + 2 \cos \delta}} \Delta^2 + \dots$$

Для фиксированной призмы ($\delta = \text{const}$) зависимость угла отклонения φ луча света от разницы Δ между падающим и вышедшим лучами представляет собой сходящийся ряд по четным степеням Δ . При ходе лучей, близком к симметричному ($\Delta \rightarrow 0$), угол отклонения φ луча света от первоначального направления остается практически постоянным (слагаемыми второго порядка малости и выше можно пренебречь). С увеличением Δ угол отклонения φ луча света от первоначального направления возрастает квадратично (для средних значений Δ). Для корректного представления зависимости $\varphi(\Delta)$ при больших значениях Δ ряд должен содержать также слагаемые четвертого, шестого и т.д. порядка малости.

Зависимость $\varphi(\Delta)$, представленную в виде ряда, удобно исследовать на экстремум. Это позволяет акцентировать внимание студентов на изучаемом материале с привлечением доступного для них математического аппарата. Поэтому вычислим производную

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

Легко заметить, что все сомножители в числителе и знаменателе, кроме Δ , положительные. Поэтому производная для отрицательных углов Δ меньше нуля, для положительных – больше нуля, а при $\Delta = 0$ – обращается в ноль. Следовательно, при $\Delta = 0$ угол φ отклонения луча от первоначального направления имеет минимум.

Так как при нормальной дисперсии показатель преломления n света медленно изменяется с увеличением длины волны, углы минимального отклонения луча света от первоначального направления при симметричном ходе лучей через призму мало отличаются друг от друга для света различных длин волн

$$\varphi(\Delta = 0) = \frac{\pi}{2} - \delta - \arcsin\left(1 - \frac{n^2 \sin^2 \delta}{1 + \cos \delta}\right).$$

Таким образом, проведенный теоретический анализ позволяет сделать вывод, что при экспериментальных исследованиях следует ожидать, что в условиях несимметричного хода лучей зависимости $\varphi(\delta)$ и $\varphi(\Delta)$ в широком диапазоне значений δ и Δ будут носить нелинейный характер.

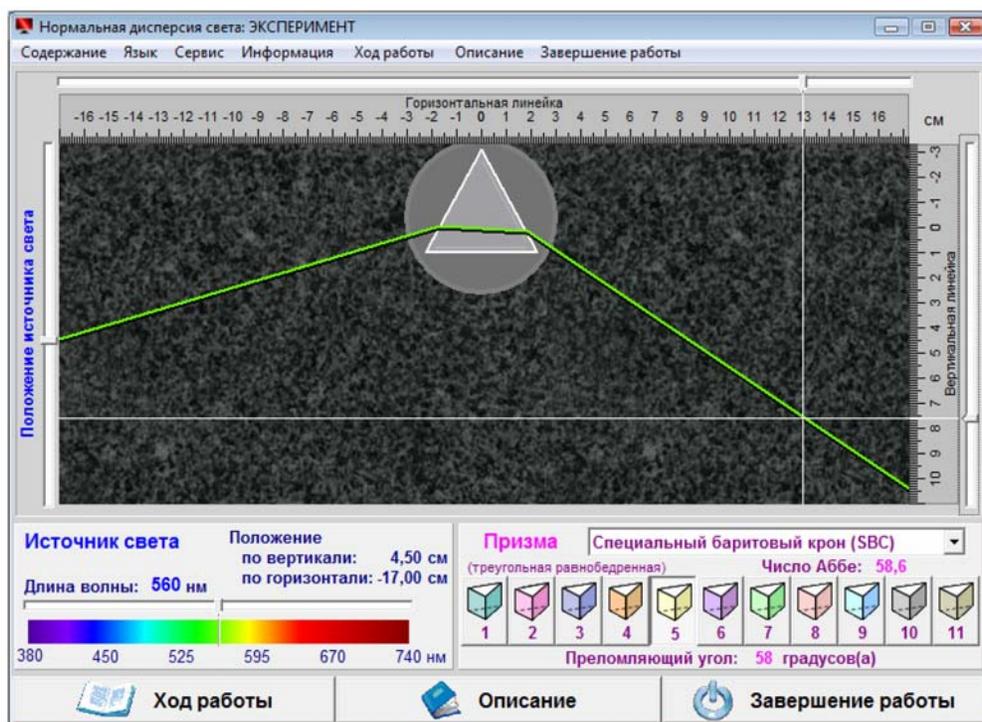


Рисунок 2. Компьютерная лабораторная работа «Нормальная дисперсия света».

Модель экспериментальной установки

На основе проведенного анализа принципиальная схема соответствующих экспериментальных исследований авторами была предложена и реализована в виде лабораторной работы по изучению моделей физических процессов на компьютере «Нормальная 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 $\varphi(\delta)$ и разности между углами наклона падающего и вышедшего лучей $\varphi(\Delta)$. На основании этих исследований они выбирают оптимальные условия для изучения дисперсии света, при которых проводят соответствующие измерения зависимости показателя преломления $n(\lambda)$ от длины волны света.

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 линеек, 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.

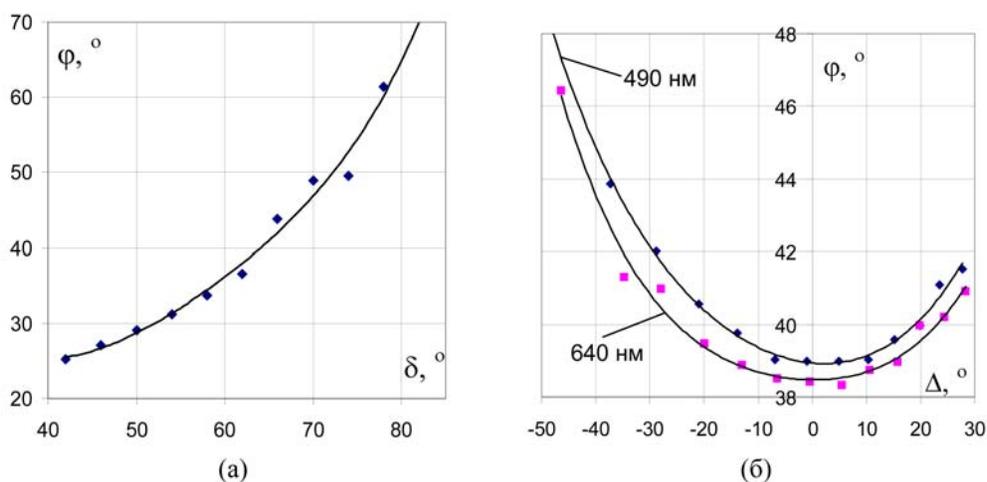


Рисунок 3. Зависимость угла отклонения φ луча света от преломляющего угла δ призмы (а), от разности Δ между углами наклона падающего и вышедшего лучей (б).

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 плавленного кварца. Для всех призм угол падения луча света составлял 57° .

На рисунке 3б приведены результаты исследования зависимости угла отклонения $\varphi(\Delta)$ света от разности между углами наклона падающего и вышедшего лучей для призмы из специального баритового крона с преломляющим углом 50° для голубого (490 нм) и красного света (640 нм). Полученные зависимости имеет довольно широкий минимум вблизи нуля (при симметричном ходе лучей), что и осложняет его экспериментально 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.

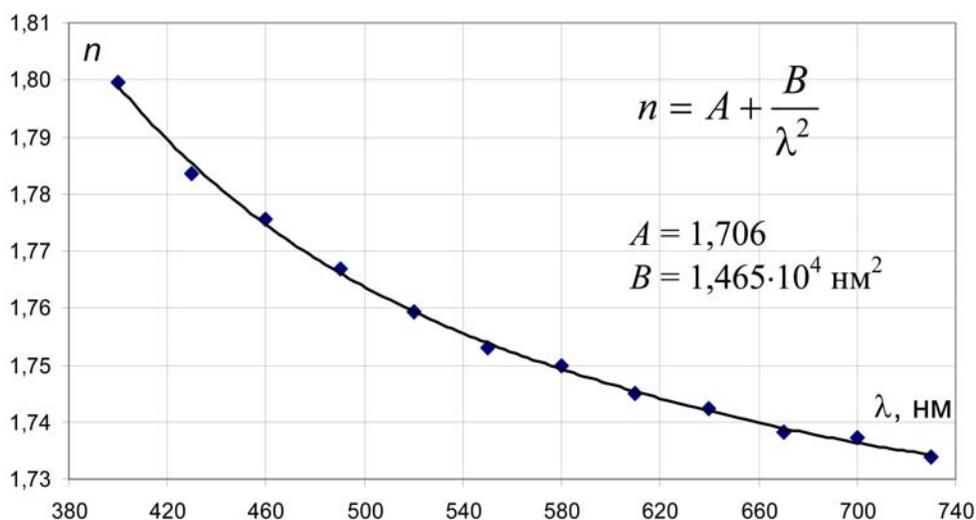


Рисунок 4. Зависимость показателя преломления n от длины волны λ .

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.

Исходя из проведенного анализа особенностей прохождения света через призму, на последнем этапе выполнения работы для получения кривой дисперсии $n(\lambda)$ 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%, а погрешность измерения показателя преломления для света фиксированной длины волны составляет менее 1%.

По мнению авторов, данная работа должна выполняться в комплексе с натурной лабораторной работой по изучению дисперсии света с помощью треугольной призмы и гониометра. 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 треугольной призмы и 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 натурального эксперимента с использованием треугольной призмы и 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 натурального 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 [8, 9], который разрабатывается на кафедре теоретической и экспериментальной физики ТПУ с 2002 г.

Литература

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. Лабораторный практикум по физике / Под ред. А.С. Ахматова. – М.: Высшая школа, 1980. – 360 с.
5. Лабораторные занятия по физике / Под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1983. – 704 с.
6. Гринько М.С., Вакулюк А.А. Лабораторный практикум по физике: Учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2012. – 480 с.
7. Лукичев Д.Н., Фомин С.В., Красников А.С. Экспериментальное изучение нормальной дисперсии света в лаборатории оптики в курсе общей физики // Физическое образование в вузах. – 2010. – Т. 16, № 1. – С. 50-57.
8. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г., Стародубцев В.А. Комплекс компьютерных моделирующих лабораторных работ по физике: принципы разработки и опыт применения в учебном процессе // Физическое образование в вузах. – 2006. – Т. 12, № 2. – С. 85-95.
9. Revinskaya O.G., Kravchenko N.S. 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. – Volume 8, Part 2. – PP. 51-59.