



СОДЕРЖАНИЕ

Основная школа

Р. М. Абдулов М. С. Свечникова	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ РАЗДЕЛА «ДАВЛЕНИЕ»	3
-----------------------------------	---	---

Старшая школа

М. А. Фаддеев Ю. В. Масленникова Н. С. Тараканов	ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ ПУЧКОВ СВЕТА В ТРЕУГОЛЬНОЙ ПРИЗМЕ	11
--	---	----

Высшая школа

А. И. Грибков Р. В. Романов	ПРОСТОЙ МАЯТНИК: ИСТОРИЯ, ТЕОРИЯ, РЕАЛЬНОСТЬ И ВИРТУАЛЬНОСТЬ	22
А. А. Кривушин О. А. Милованова С. А. Кривушина	ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИМПЕДАНС БИОТКАНИ В УЧЕБНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ МЕДИЦИНСКОГО ВУЗА	40
В. В. Майер Ю. А. Корнев	ПОЛУЧЕНИЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПЬЕЗОГЕНЕРАТОРА	56

Технологии обучения

П. В. Зуев В. Е. Сидоров	ПРОПЕДЕВТИКА ОБУЧЕНИЯ ФИЗИКЕ УЧАЩИХСЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КЛАССОВ НАЧАЛЬНОЙ ШКОЛЫ В УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА	66
-----------------------------	---	----

Науковедение

Ю. А. Сауров	ЭССЕ О КНИГЕ «ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ»	76
--------------	---	----

АВТОРЫ ЖУРНАЛА	80
----------------------	----

Редакция журнала:

В. В. Майер (главный редактор), Р. В. Акатов, Е. И. Вараксина, Л. С. Кропачева

Редакционный совет:

С. В. Барышников	д.ф.-м.н., профессор, Благовещенск
И. В. Гребенев	д.п.н., профессор, Нижний Новгород
М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
О. В. Лебедева	д.п.н., доцент, Нижний Новгород
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров
А. П. Усольцев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
А. А. Шаповалов	д.п.н., профессор, Барнаул

Оргкомитет конференции:

Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Ф. А. Сидоренко	д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Я. А. Чиговская-Назарова	к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, Глазов
Т. Н. Шамало	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Перечень ВАК: Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.
E-mail: uch-fiz@mail.ru, kropach@bk.ru

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686, перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77–69506.

Подписной индекс: 79876.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 02.09.25. Подписано в печать 25.09.25.

Дата выхода в свет: 30.09.25.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 5,0.

Заказ 171. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Экспериментальная установка для проверки закона Кулона в демонстрационном опыте.

Научная статья

ББК 74.262.23

УДК 372.853

М. А. Фаддеев, Ю. В. Масленникова, Н. С. Тараканов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ ПУЧКОВ СВЕТА В ТРЕУГОЛЬНОЙ ПРИЗМЕ

В статье описана простая и доступная экспериментальная установка, обеспечивающая качественные и количественные учебные исследования преломления и отражения световых пучков в треугольной стеклянной призме. Представлена методика проведения экспериментов по геометрической оптике, подтверждающих выводы физической теории и способствующих развитию познавательных умений учащихся в системе дополнительного образования. Показано, что попытка определить интенсивности отраженного и преломленного пучков приводит к необходимости учета поляризации света, то есть перехода от геометрической оптики к волновой.

Ключевые слова: геометрическая оптика, учебные исследования, экспериментальная установка, треугольная призма, отражение и преломление света, коэффициенты Френеля, дополнительное образование.

M. A. Faddeev, Yu. V. Maslennikova, N. S. Tarakanov

INVESTIGATION OF REFRACTION AND REFLECTION OF LIGHT BEAMS IN A TRIANGULAR PRISM

The article describes a simple and affordable experimental setup that provides qualitative and quantitative educational studies of the refraction and reflection of light beams in a triangular glass prism. A methodology for conducting experiments in geometric optics is presented, confirming the conclusions of the physical theory and contributing to the development of cognitive skills of students in the system of additional education. It is shown that an attempt to determine the intensities of reflected and refracted beams leads to the need to take into account the polarization of light, that is, the transition from geometric optics to wave optics.

Keywords: geometric optics, educational research, experimental setup, triangular prism, reflection and refraction of light, Fresnel coefficients, additional education.

DOI: 10.62957/2307-5457-2025-3-11-21

Введение

Видимый свет представляет собой поток электромагнитного излучения с длиной волны в диапазоне 400–700 нм. Следовательно, физика взаимодействия света с веществом должна базироваться на волновой теории. Однако множество явлений и их технических применений успешно описываются простыми законами геометрической оптики: прямолинейного распространения, отражения и преломления света. Эти законы позволяют рассчитывать и конструировать весьма сложные оптические системы и в то же время они достаточно просты, чтобы на их основе разрабатывать содержание учебно-исследовательских работ учащихся. В учебном пособии [1] приведены несколько вариантов разработанных ранее экспериментальных заданий по теме «Геометрическая оптика». Его содержание дополняет исследование относительной яркости лучей, отраженных и проходящих через границу раздела двух прозрачных сред, приводимое в данной статье.

Преломление и отражение света на гранях треугольной призмы

На начальном этапе изучения закона преломления света традиционно рассматривается прохождение луча света через прозрачную треугольную призму. В базовом школьном курсе физики обычно ограничиваются качественным описанием преломления света на двух гранях призмы (рис. 1). Мы предлагаем учащимся, интересующимся физикой, исследовать зависимость угла отклонения луча, вышедшего из призмы, от угла падения света на призму.

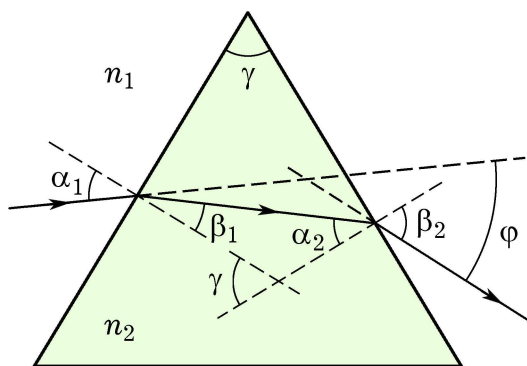


Рис. 1. Геометрическая схема прохождения луча света сквозь треугольную призму: n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления окружающей среды и вещества призмы ($n_1 < n_2$)

Геометрический анализ чертежа на рис. 1 дает равенства [2]:

$$\beta_1 + \alpha_2 = \gamma, \quad \alpha_1 + \beta_2 = \varphi + \gamma. \quad (1)$$

Углы преломления связаны с соответствующими углами падения законом Снеллиуса:

$$\sin \alpha_1 = n \sin \beta_1, \quad n \sin \alpha_2 = \sin \beta_2, \quad (2)$$

где $n = n_2/n_1$ — относительный показатель преломления. Система приведенных уравнений позволяет получить угол отклонения φ как функцию угла падения α_1 при известных показателе преломления n и преломляющем угле γ призмы:

$$\varphi = \alpha_1 - \gamma + \arcsin \left[n \sin \left(\gamma - \arcsin \frac{\sin \alpha_1}{n} \right) \right]. \quad (3)$$

Следует иметь в виду, что при $n \sin \alpha_2 > 1$ последнее выражение в (2) теряет физический смысл, и формула (3) не применима. Это означает, что на второй грани происходит полное внутреннее отражение. Как следствие, функция $\varphi = \varphi(\alpha_1)$ определена на интервале $[\alpha_{1 \min}, \pi/2]$, где выражение угла $\alpha_{1 \min}$:

$$\alpha_{1 \min} = \arcsin \left[n \sin \left(\gamma - \arcsin \frac{1}{n} \right) \right] \quad (4)$$

получается из условия $n \sin \alpha_2 = 1$.

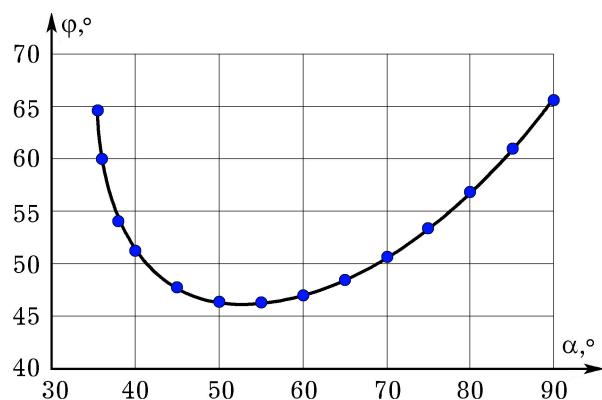


Рис. 2. Зависимость угла отклонения φ от угла падения α_1 при $n = 1,6$ и преломляющем угле призмы $\gamma = 60^\circ$

Например, для $n = 1,6$ и $\gamma = 60^\circ$ угол $\alpha_{1 \min} \approx 35,6^\circ$. График соответствующей функции $\varphi = \varphi(\alpha_1)$ изображен на рис. 2. Немонотонная зависимость (3) легко получается в эксперименте.

Более интересным для экспериментального изучения является тот факт, что на каждой грани призмы происходит частичное отражение светового пучка. Как следствие, при падении луча света на призму, она становится источником нескольких лучей, что часто удивляет учащихся. Данная работа посвящена исследованию процессов отражения и преломления лучей света на гранях треугольной призмы, основание которой представляет собой равнобедренный прямоугольный треугольник (такую призму в оптике принято называть *прямоугольной* [3]), и качественному исследованию их интенсивности.

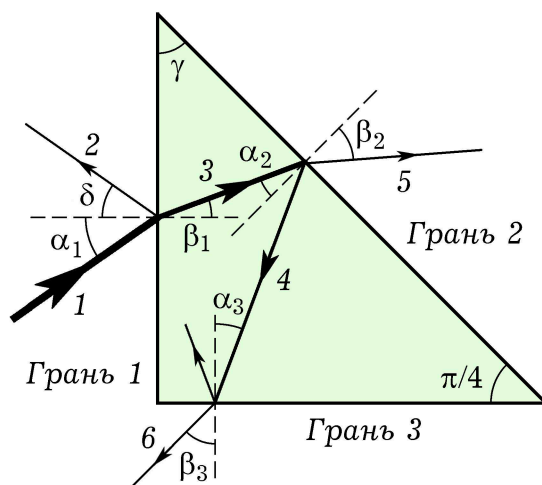


Рис. 3. Преломление и отражение лучей света в прямоугольной равнобедренной призме

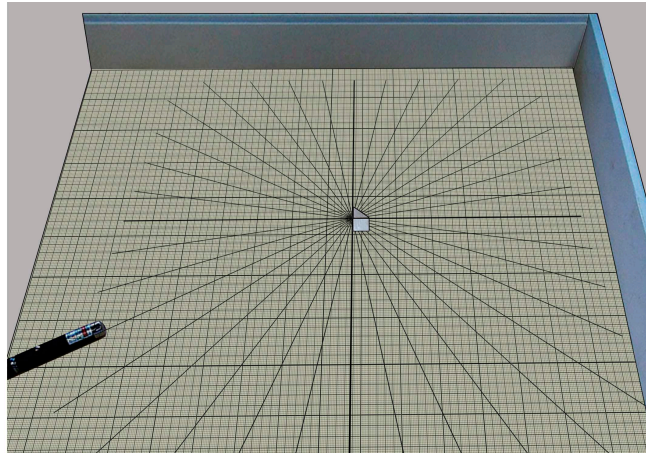
Луч света 1 направляют под углом падения α_1 на катетную грань призмы (рис. 3). Наблюдают, что при этом возникают отраженный 2 и преломленный 3 лучи. В опыте нужно подтвердить закон отражения света, согласно которому угол отражения света равен углу падения (оба угла отсчитываются от нормали к плоскости грани):

$$\delta = \alpha_1. \quad (5)$$

Идущий внутри призмы и падающий на ее гипотенузную грань луч 3 дает отраженный и преломленный лучи 4 и 5. Отраженный луч 4 падает на вторую катетную грань призмы под углом α_3 и выходит из нее под углом преломления β_3 . Выполнив геометрический анализ треугольников на рис. 3 при условии $\gamma = 45^\circ$, получают равенство:

$$\beta_3 = \alpha_1. \quad (6)$$

1



2

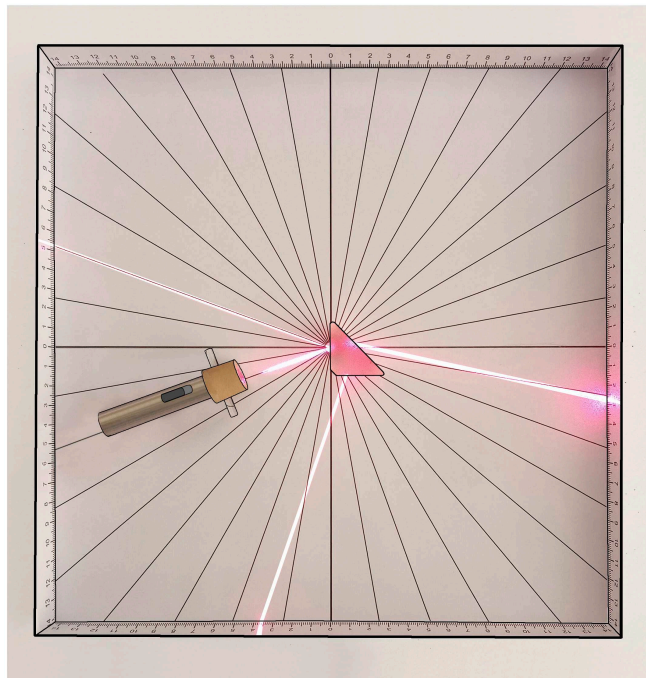


Рис. 4. Экспериментальная установка: 1 — на лист миллиметровой бумаги установлена прямоугольная равнобедренная призма, слева внизу — лазерная указка; 2 — вариант установки из плотной белой бумаги, лазер снабжен цилиндрической линзой, подробно описанной в работах [4, 5]

Предметом экспериментального исследования является измерение углового положения наиболее ярких выходящих из призмы лучей 2, 5 и 6 (рис. 3), а также определение зависимости углов δ , β_2 и β_3 от угла падения α_1 луча на призму.

В обычных школьных физических кабинетах нет оптического стола с точными гониометрическими головками, поэтому экспериментальная установка может быть собрана из подручных средств. Все элементы оборудования размещают на плоском столе, который покрыт листом миллиметровой бумаги размером $60 \times 60 \text{ см}^2$. На листе отмечено положение центра, через который проведены радиальные линии через 10° . По краям листа миллиметровой бумаги установлены барьеры с белой поверхностью высотой около 5 см (рис. 4.1).

Основой второго варианта установки является угловая шкала с ценой деления 10° , построенная в компьютерной программе и распечатанная на плотной белой бумаге формата A4. На такой же бумаге распечатывают две линейные шкалы с миллиметровыми делениями, предварительно построенные посредством компьютера. Из них делают два бортика и собирают экспериментальную установку в соответствии с рис. 4.2.

Для опыта используют прямоугольную стеклянную призму, которую устанавливают так, чтобы вершина ее преломляющего угла γ оказалась вблизи центра угловой шкалы (рис. 5), и катетная грань, на которую будет падать свет, совпала с одной из прямых линий этой шкалы. В опытах используют лазерную указку, дающую узкий пучок красного света диаметром примерно 1 мм. Такой пучок можно считать лучом, к которому применимы законы геометрической оптики.

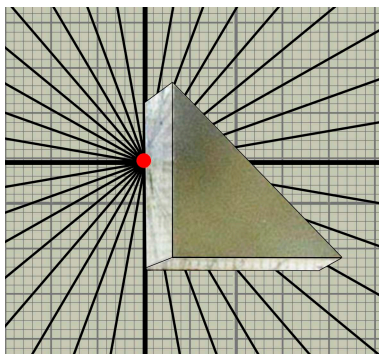


Рис. 5. Положение призмы: красная точка — место падения луча лазера

В ходе эксперимента угол падения α_1 луча на катетную грань призмы последовательно устанавливают от 10° до 80° с шагом 10° .

Лучи, выходящие из призмы (отраженные и преломленные), создают яркие пятна на белых поверхностях бортиков, ограничивающих лист. Для определения места падения луча под пятном карандашом ставилась отметка (риска) на бумаге (рис. 6).

По координатам точек падения лучей вычисляют длины катетов прямоугольных треугольников, изображенных на рис. 7. Углы δ , β_2 , β_3 рассчитывают по очевидным формулам:

$$\delta = \arctg \frac{y_1}{x_1}, \quad \beta_2 = \frac{\pi}{4} - \arctg \frac{y_2}{x_2},$$

$$\beta_3 = \arctg \frac{y_3}{x_3}. \quad (7)$$

Измерения и расчеты показали, что равенства (5) и (6) выполняются для всех углов падения $\alpha_1 \in [10^\circ, 80^\circ]$ в пределах допустимых погрешностей.

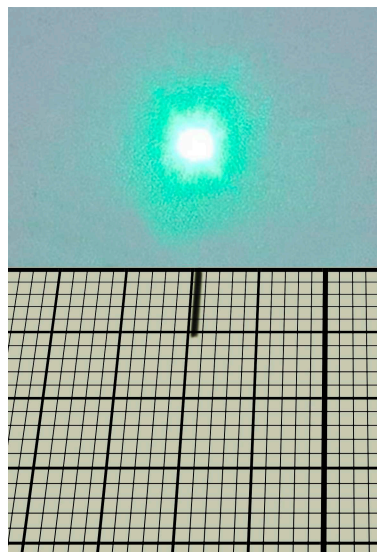


Рис. 6. Пятно от лазерного пучка и соответствующая риска

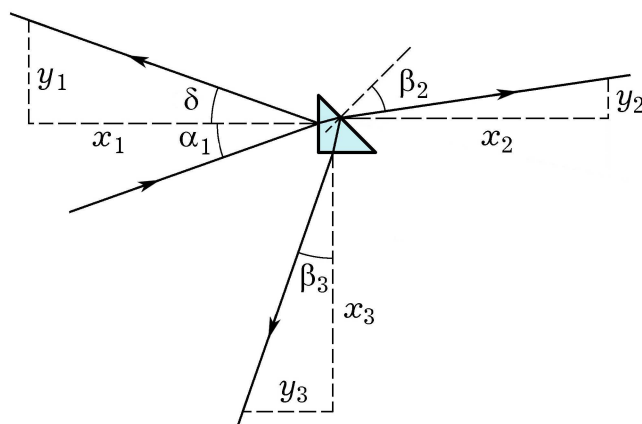


Рис. 7. Прямоугольные треугольники для вычисления углов δ , β_2 и β_3

При сравнении измеренных в эксперименте углов β_2 с расчетными значениями (рис. 8) следует помнить, что угол β_2 зависит от

относительного показателя преломления $n = n_2/n_1$, согласно уравнениям (1) и (2):

$$\beta_2 = \arcsin(n \sin \alpha_2), \quad \text{где} \quad \alpha_2 = \frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{\sin \alpha_1}{n}. \quad (8)$$

Показатель преломления n материала призмы из набора оборудования школьного кабинета неизвестен. По этой причине была проведена оптимизация величины n . Критерием оптимальности являлся минимум суммы квадратов разностей экспериментальных и расчетных значений угла β_2 [6]. Оптимум был достигнут при $n = 1,55$, что соответствует показателям преломления оптических стекол.

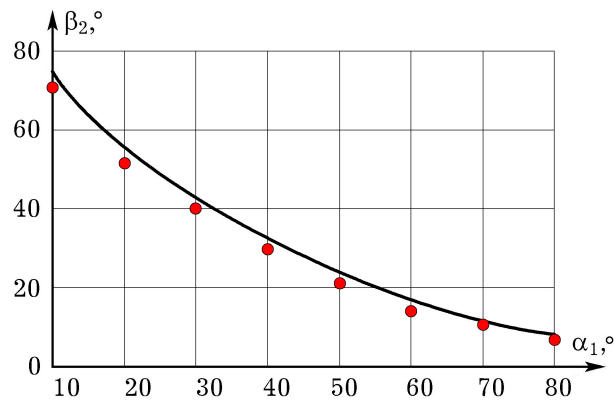


Рис. 8. Зависимость угла преломления β_2 на второй грани от угла падения α_1 на первую грань призмы ($n = 1,55$): сплошная линия — теория, точки — эксперимент

Качественное исследование интенсивности отраженного и преломленного света

В опытах визуально наблюдается различная яркость исследуемых лучей, при этом яркость существенно зависит от величины углов. Относительная яркость лучей, отраженных и проходящих через границу раздела двух прозрачных сред, выражается коэффициентами Френеля.

Коэффициенты Френеля [7, с. 410–411] зависят от поляризации излучения. Для света, плоскость поляризации которого лежит в плоскости падения, коэффициент отражения:

$$R_{\parallel} = \left(\frac{n \cos \alpha - \cos \beta}{n \cos \alpha + \cos \beta} \right)^2, \quad (9)$$

где α — угол падения, β — угол преломления, n — относительный показатель преломления.

Для света, плоскость поляризации которого перпендикулярна плоскости падения, коэффициент отражения:

$$R_{\perp} = \left(\frac{\cos \alpha - n \cos \beta}{\cos \alpha + n \cos \beta} \right)^2. \quad (10)$$

В наших экспериментах не фиксировалась плоскость поляризации, поэтому для расчетов использовалось усредненное значение:

$$R = \frac{R_{\perp} + R_{\parallel}}{2}. \quad (11)$$

Для коэффициентов прохождения $T_{\perp}$ и $T_{\parallel}$ аналогичные формулы имеют вид:

$$T_{\perp} = \frac{n \cos \beta}{\cos \alpha} \left(\frac{2 \cos \alpha}{\cos \alpha + n \cos \beta} \right)^2, \quad T_{\parallel} = \frac{n \cos \beta}{\cos \alpha} \left(\frac{2 \cos \alpha}{n \cos \alpha + \cos \beta} \right)^2, \quad (12)$$

$$T = \frac{T_{\perp} + T_{\parallel}}{2}. \quad (13)$$

Перенумеруем грани призмы в соответствии с порядком падения на них света (рис. 3). Для расчетов относительной яркости примем за единицу интенсивность луча 1, падающего на первую грань призмы. Тогда интенсивность R_1 луча 2, отраженного от первой грани выразится формулой (11). Интенсивность луча 5, выходящего из второй грани, определяется произведением коэффициентов прохождения света через первую и вторую грани призмы $T_1 T_2$. Наконец, относительная интенсивность луча, выходящего из третьей грани, равна произведению коэффициента прохождения через первую грань, коэффициента отражения от второй грани (внутри призмы) и коэффициента прохождения через третью грань $T_1 R_2 T_3$.

Результаты расчетов относительной яркости трех исследуемых лучей приведены на рис. 9. Характер зависимостей, показанных на этом рисунке, совпадает с результатами наблюдений (рис. 4.2). Действительно, яркость луча, вышедшего из второй грани, равная $T_1 T_2$, значительно выше, чем у двух других лучей. В опытах наблюдается заметное уменьшение интенсивности этого луча в областях малых ($\alpha_1 < 20^\circ$) и больших ($\alpha_1 > 60^\circ$) углов.

Яркость луча, отраженного от первой грани R_1 , сравнительно мала вплоть до углов $\alpha_1 \sim 50^\circ$. Далее, с ростом угла падения α_1 она резко возрастает, что подтверждается наблюдениями.

Выходящий из третьей грани луч интенсивностью $T_1 R_2 T_3$ сравнительно более бледный, кроме области малых углов падения ($\alpha_1 < 20^\circ$).

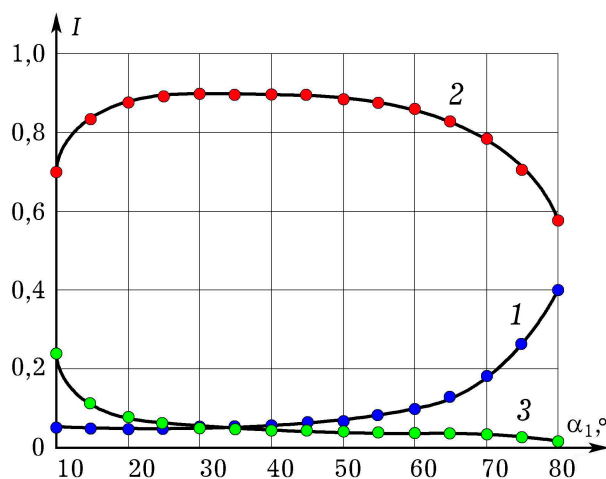


Рис. 9. Угловые зависимости относительных интенсивностей лучей, выходящих из граней исследуемой призмы ($n = 1,55$): 1 — луч, отраженный от первой грани (R_1); 2 — луч, вышедший из второй грани (T_1T_2); 3 — луч, вышедший из третьей грани ($T_1R_2T_3$)

Заметим, что расчеты относительных интенсивностей проводились без учета поглощения света внутри призмы. В опытах использовалась призма малых размеров и в первом приближении поглощением можно пренебречь, так как в работе не проводилось количественное измерение интенсивности лучей.

Как вариант можно продолжить геометрический анализ распространения лучей в призме. На третьей грани происходит частичное отражение света внутрь призмы. Отраженный луч, пройдя через призму, попадет на первую грань изнутри. Если не произойдет полное внутреннее отражение, часть светового пучка, преломившись, выйдет наружу через первую грань призмы. И так далее... Однако, все лучи, кроме трех указанных, имеют гораздо меньшую интенсивность и их наблюдение требует специальной аппаратуры.

Заключение

Предложенная учебно-исследовательская работа, безусловно, выходит за рамки школьного курса физики. Однако опыт преподавания показывает, что мотивированные учащиеся старших классов успешно справляются с изучением представленного в статье теоретического материала геометрической оптики и практической реализацией разработанного эксперимента. Изучая отражение и преломление световых лучей, они с удивлением обнаруживают, что в

привычных оптических явлениях скрывается волновая природа света. Поэтому школьники с большим интересом относятся к необходимости перехода от геометрической к волновой оптике и с пониманием воспринимают формулы Френеля, которые еще предстоит научиться выводить в университетах. Намаловажна также исключительная простота и доступность экспериментальной установки, благодаря которым она может быть воспроизведена в процессе проектной деятельности обучающихся даже основной школы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масленникова Ю. В., Фаддеев М. А. Экспериментальные задачи по физике. Геометрическая оптика. Н. Новгород. ННГУ, 2021. — 102 с.
2. Фаддеев М. А., Лебедева О. В. Геометрическая оптика. Н. Новгород. ННГУ, 2021. — 112 с.
3. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. Т. 1. — М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1948. — 662 с.
4. Майер В. В., Канаева А. Ю. Организация учебного познания при изучении преломления света на сферической поверхности // Учебная физика. — 2002. — № 2. — С. 42–50.
5. Вараксина Е. И., Попова А. А. Дидактический ресурс ученического проекта «Оптические свойства эллипса» // Учебная физика. — 2021. — № 2. — С. 13–21.
6. Фаддеев М. А. Экспериментальная обработка результатов экспериментов. ННГУ, 2006. — 120 с.
7. Сивухин Л. Д. Общий курс физики. Оптика. — М.: Наука, 1980. — 752 с.

Национальный исследовательский
Нижегородский государственный
университет имени Н. И. Лобачевского

Поступила в редакцию 26.03.25.