

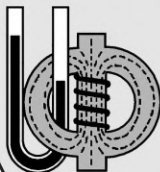
ISSN 2307-5457

*Primum
inter pares*

Материалы XXIX Всероссийской
научно-практической конференции

„Учебный физический эксперимент:
Актуальные проблемы. Современные
решения“

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ



**УЧЕБНАЯ
ФИЗИКА**

Апрель - июнь 2024 №2

Издается с января 1997 года

СОДЕРЖАНИЕ

Основная школа

В. В. Майер	ЦИФРОВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ РЕСУРС:
Е. И. Вараксина	ФОРМИРОВАНИЕ НАГЛЯДНОГО ОБРАЗА ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА.....3

Старшая школа

В. В. Майер	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
Е. И. Вараксина	ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ.....16

Высшая школа

С. А. Герасимов	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТИ,
Т. М. Седов	МАГНИТ С ПАРУСОМ И ВРАЩАТЕЛЬНЫЙ МОМЕНТ САМОДЕЙСТВИЯ.....32

И. В. Гребенев	ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
П. В. Казарин	ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ СТОЯЧИХ
Е. В. Чупрунов	ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.....40

С. В. Барышников	ЗНАКОМСТВО СТУДЕНТОВ С ИДЕЯМИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ НА ЗАНЯТИЯХ ПО ФИЗИКЕ.....52
------------------	--

Исследования

А. С. Куимов	ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ
П. В. Зув	ГРАМОТНОСТИ УЧАЩИХСЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....58

Науковедение

Ю. А. Сауров	КОНСТАНТИН КОХАНОВ: ДВИЖЕНИЕ ВПЕРЕД.....66
--------------	--

АВТОРЫ ЖУРНАЛА.....72

Редакция журнала:

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

Редакционный совет:

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

Оргкомитет конференции:

Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Г. Г. Никифоров	к.п.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
А. Ю. Пентин	к.ф.-м.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
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: kropach@mail.ru, uch-fiz@mail.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 03.06.24. Подписано в печать 17.06.24.

Дата выхода в свет: 24.06.24.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,5.

Заказ 164. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Отремонтированная электрофорная машина (Майер В. В., Вараксина Е. И., Васильев И. А., Корнев Ю. А. Ремонт школьной электрофорной машины как средство развития инженерной компетенции // Учебная физика. — 2023. — № 2. — С. 14–37).

Научная статья

ББК 74.262.23

УДК 372.853:535

В. В. Майер, Е. И. Вараксина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Представлен методический этап дидактического исследования процесса изучения в средней школе основных законов физической оптики. В результате разработана серия демонстрационных опытов по экспериментальному обоснованию законов прямолинейного распространения света, независимости световых пучков, отражения и преломления света. Каждый опыт дополнен заданием для учащихся, которое может быть выполнено ими частично или полностью, самостоятельно или во внеурочной учебно-исследовательской деятельности под руководством учителя.

Ключевые слова: физическая оптика, основные законы, экспериментальное обоснование, демонстрационные опыты, учебные исследования.

V. V. Mayer, E. I. Varaksina

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE BASIC LAWS OF PHYSICS OPTICS

The methodological stage of the didactic study of studying the basic laws of physics optics in secondary school is presented. As a result, a series of demonstration experiments has been developed to experimentally substantiate the laws of rectilinear propagation of light, the independence of light beams, reflection and refraction of light. Each experiment is complemented by tasks for students, which can be completed partially or completely by them, independently or in optional educational and research activities under the guidance of a teacher.

Keywords: physics optics, basic laws, experimental substantiation, demonstration experiments, educational researches.

1. Введение

Знаменитый университетский учебник «Оптика», созданный выдающимся физиком и педагогом Г. С. Ландсбергом, начинается так: «Уже в первые периоды оптических исследований были *из опыта установлены следующие четыре основных закона оптических явлений* [выделено нами]:

1. Закон прямолинейного распространения света.
2. Закон независимости световых пучков.
3. Закон отражения света от зеркальной поверхности.
4. Закон преломления света на границе двух прозрачных сред» [1, с. 13].

В современных школьных учебниках физики доказательство справедливости первого из основных законов оптики отсутствует, второй закон вообще не упоминается, третий закон обоснован экспериментом лишь частично, а четвертый — разбит на два разных закона, чем кардинально отличается от третьего, который, как и раньше, почему-то содержит две общепринятые части в неразрывном единстве [2, 3, 4]. Все это и многое другое приводит к заключению, что школьные учебники физики не учат, как того требует ФГОС [5], основам метода научного познания, кратко выраженного известной схемой В. Г. Разумовского: *факты* → *модель* → *следствия* → *эксперимент* [6].

Обнаруженное противоречие между физической наукой и методикой изучения в школе основ этой науки свидетельствует об актуальности следующей проблемы дидактики физики: в какой мере современный демонстрационный эксперимент позволяет на обычных школьных уроках и во внеурочной учебно-исследовательской деятельности *на опыте установить четыре основных закона оптических явлений?*

В настоящей работе представлен возможный вариант решения этой проблемы, а именно: кратко, но со ссылками на источники информации, описаны основные этапы подготовки и выполнения учителем демонстрационных опытов; предложено экспериментальное обоснование основных законов оптики; подробно рассмотрено экспериментальное доказательство справедливости закона прямолинейного распространения света; описание каждого опыта дополнено заданием для учащихся, которое может быть выполнено ими частично или полностью, самостоятельно или во внеурочной познавательной деятельности совместно с учителем.

2. Подготовка демонстрационных опытов

Оборудование и материалы: 1) плоскопараллельная стеклянная кювета небольших размеров; 2) маломощный полупроводниковый лазер, дающий зеленое, синее, фиолетовое или ультрафиолетовое излучение; 3) источник питания лазера; 4) светодиодный фонарь белого света; 5) равнобедренная призма *флинт* [7] толщиной 21 мм из школьного набора; 6) флюоресцеин кристаллический; 7) поваренная соль (хлорид натрия); 8) стеклянная или пластиковая воронка, силиконовая трубка, зажим; 9) две пластиковые бутылки объемом 1 л каждая.

Технология самостоятельного изготовления плоскопараллельной прозрачной стеклянной кюветы подробно описана в статье [8]. Здесь мы рекомендуем увеличить толщину кюветы с 20 до 22 мм так, чтобы ее внутренние размеры составили 22 × 60 × 200 мм. Такое изменение вызвано необходимостью введения внутрь кюветы призмы флинт. В той же статье описан процесс приготовления и заливки в кювету

смешивающихся жидкостей: насыщенного раствора поваренной соли и пресной воды, подкрашенных флюоресцеином. Заметим, что для питания полупроводникового лазера литий-ионный аккумулятор на 3,7 В (18650, 2000 mAh, 3,7 V) более безопасен и удобен, чем рекомендованный в [8] сетевой источник.

3. Экспериментальное обоснование основных законов оптики

На школьных уроках необходима демонстрация нескольких экспериментов, на качественном уровне подтверждающих справедливость основных законов оптики.

Опыт 1. Прямолинейное распространение света. Направляют сквозь кювету с водным раствором флюоресцеина ультрафиолетовое (фиолетовое или зеленое) излучение полупроводникового лазера. Учащиеся наблюдают узкую ярко светящуюся зеленым светом полосу — световой пучок, который приближенно можно считать лучом света (рис. 1.1). Непосредственные наблюдения показывают, что этот луч является отрезком прямой линии.

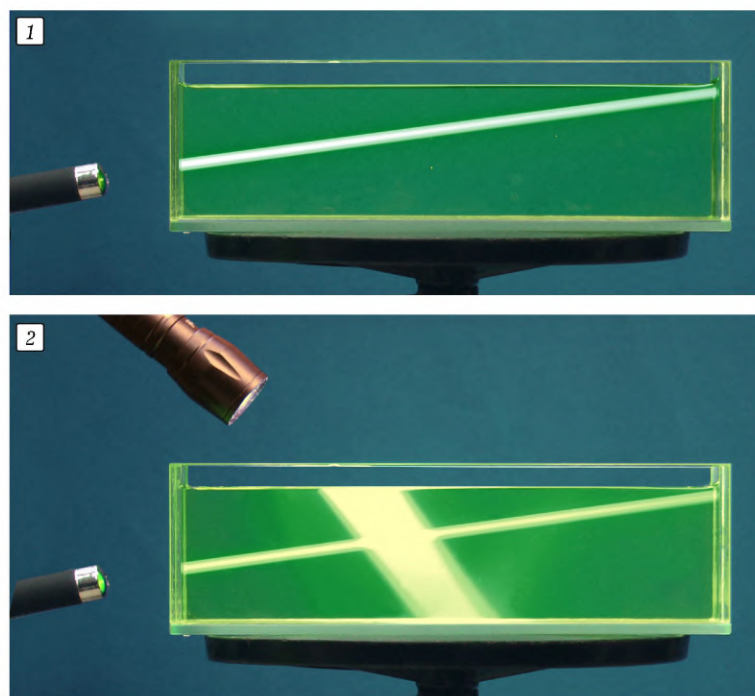


Рис. 1. Основные законы оптики: 1 — прямолинейного распространения света; 2 — независимости световых пучков

Опыт 2. Закон независимости световых пучков. В условиях предыдущего опыта сверху на поверхность флуоресцирующей жидкости направляют широкий пучок белого света от светодиодного фонаря. Выключают и включают сначала фонарь, а затем лазер, и показывают что пересекающиеся пучки света не оказывают друг на друга никакого влияния: каждый из них распространяется так, как если бы другого не было (рис. 1.2).

Опыт 3. Закон отражения света. Напоминают формулировку закона отражения света, которая известна школьникам из учебника для 9 класса [3], и состоит из двух частей: 1) луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела сред в точке падения, лежат в одной плоскости; 2) угол отражения света равен углу падения. Чтобы подтвердить справедливость этого закона, направляют узкий пучок лазерного излучения так, чтобы он несколько раз отразился внутри кюветы от ее передней и задней стенок. При наблюдении сверху кюветы обучающиеся видят равенство углов отражения и падения света при каждом отражении от стенок кюветы (рис. 2.1). Глядя спереди кюветы, они обнаруживают, что все падающие и отраженные лучи лежат в одной плоскости (рис. 2.2).

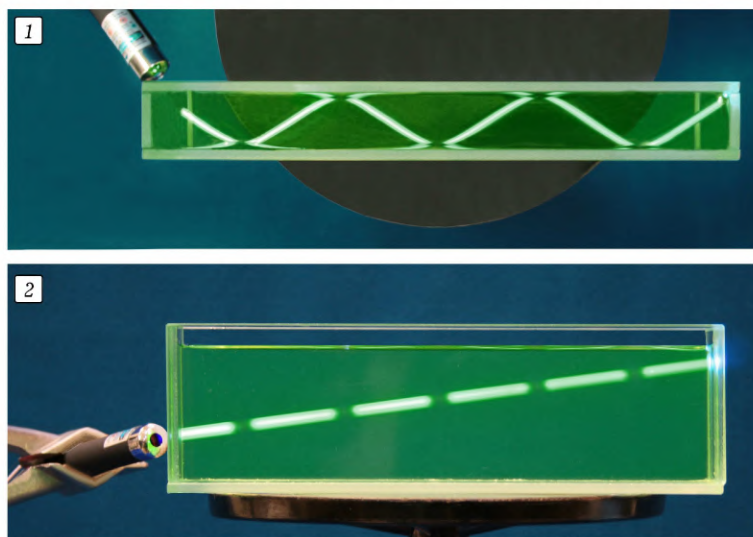


Рис. 2. Многократное полное внутреннее отражение света от стеклянных стенок кюветы: 1 — вид сверху; 2 — тот же самый пучок, вид спереди

Опыт 4. Закон преломления света. Подобно закону отражения, закон преломления состоит из двух частей: 1) луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела сред в точке падения, лежат в одной плоскости; 2) отношение синуса

угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, которая называется относительным показателем преломления второй среды относительно первой.

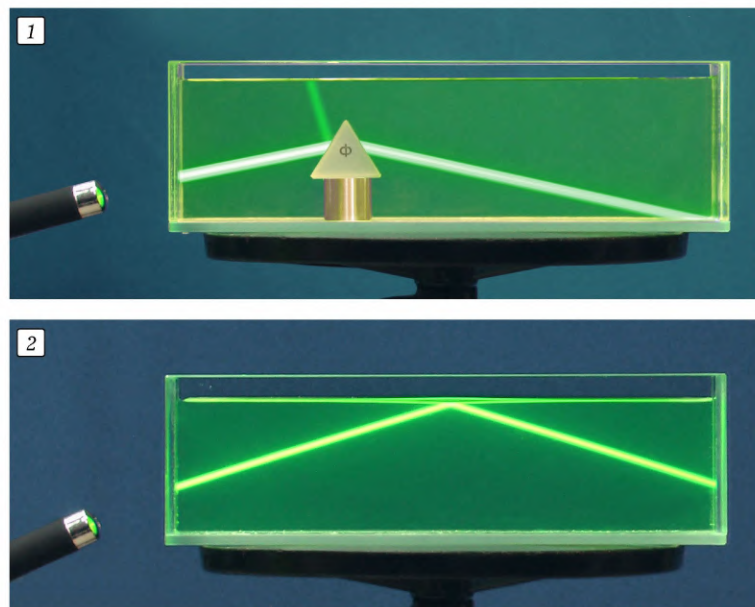


Рис. 3. Отражение и преломление света на плоской границе оптически однородных сред: 1 — отражение и преломление света на плоских гранях равнобедренной стеклянной призмы, находящейся в воде; 2 — полное внутреннее отражение света на границе вода–воздух

Для экспериментального обоснования этого закона на дно кюветы с водным раствором флюоресцеина аккуратно ставят призму флинт, двусторонним скотчем приклеенную к дюралевой стойке. Пучок лазерного излучения, идущий вдоль кюветы, направляют на боковую грань призмы. Наблюдают, что свет на плоской границе раздела двух прозрачных сред частично отражается и частично преломляется (рис. 3.1). Поворачивают лазер вокруг его оси, добиваясь максимальной яркости отраженного пучка. (Учитель знает, что это произойдет в случае, когда плоскость поляризации падающего пучка будет перпендикулярна плоскости падения света [1, с. 438]. Поэтому на возможные вопросы школьников о физическом смысле производимых манипуляций он отвечает, что отражение света — это сложное оптическое явление, которое в подробностях будет изучаться ими позже.) Обращают внимание школьников, что при падении света на границу раздела двух сред выполняется закон сохранения энергии: сумма интенсивностей отраженного и преломленного пучков света равна интенсивности падающего пучка. При наблюдениях сверху кюветы обу-

чающиеся видят, что выполняется первая часть закона преломления. Вторую часть этого закона подтверждают не в демонстрационном, а в лабораторном эксперименте.

Опыт 5. Полное внутреннее отражение света. Пучок лазерного излучения направляют через боковую стенку кюветы снизу на поверхность жидкости и постепенно увеличивают угол падения света. Учащиеся видят, что при определенном угле падения интенсивность отраженного пучка становится равной интенсивности падающего. Это означает, что свет испытывает полное внутреннее отражение от границы сред вода–воздух. Используя законы преломления и сохранения энергии (опыт 4), вводят понятие предельного угла: это такой угол падения светового луча на границу раздела между оптически более плотной и оптически менее плотной средами, при котором угол преломления был бы равен $\pi/2$, *если бы преломленный луч существовал*. Показывают, что свет, падающий на плоскую границу раздела двух прозрачных сред под углом, равным или большим предельного, полностью отражается обратно в оптически более плотную среду, и вдоль этой границы свет не распространяется.

4. Экспериментальное доказательство закона прямолинейного распространения света

Экспериментальное и теоретическое обоснование закона прямолинейного распространения света состоит из трех частей: 1) доказательство прямолинейного распространения света в оптически однородной среде; 2) доказательство криволинейного распространения света в оптически неоднородной среде; 3) теоретическое объяснение этих явлений на основе волновой модели света и принципа Гюйгенса.

Опыт 6. Преломление света на границе раздела между смешивающимися жидкостями. Удаляют половину подкрашенной флюоресцеином воды из кюветы, для чего используют, например, сифон из силиконовой трубки и резиновую грушу. Аккуратно и медленно на дно кюветы через силиконовую трубку, надетую на воронку, наливают насыщенный раствор поваренной соли, подкрашенный флюоресцеином [9]. Пучок лазерного излучения сверху под углом направляют на узкую границу раздела между смешивающимися жидкостями. Учащиеся наблюдают, что свет полностью преломляется на этой границе, совершенно не отражаясь от нее (рис. 4.1).

Опыт 7. Полное внутреннее отражение света от границы раздела между смешивающимися жидкостями. В условиях предыдущего опыта узкий лазерный пучок сбоку и снизу направляют на границу раздела двух жидкостей разной оптической плотности. Показывают обучающимся, что при малых углах падения свет полностью проходит через эту границу, не отражаясь от нее, а при больших — полностью отражается от границы между жидкостями (рис. 4.2). Но в этом опыте в

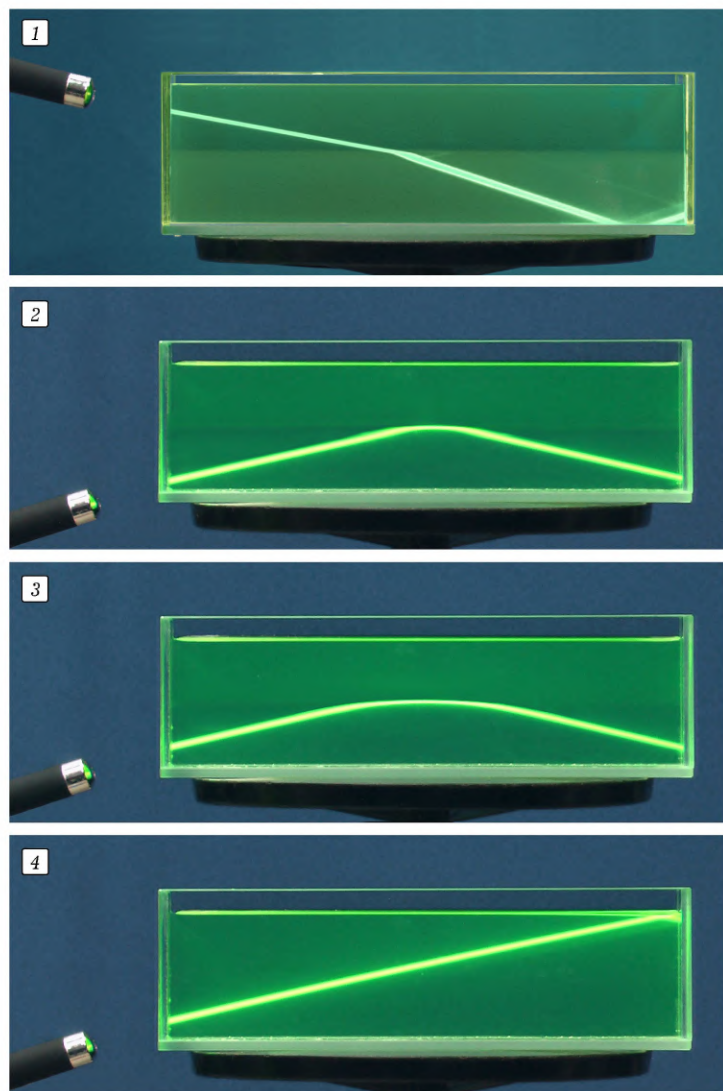


Рис. 4. Прохождение света через пограничный слой между смешивающимися жидкостями: 1 — свет не отражается от резкой границы между раствором соли и водой; 2 — свет испытывает полное внутреннее отражение от тонкого переходного слоя; 3 — толщина переходного слоя увеличена, свет в этом слое распространяется криволинейно; 4 — жидкости перемешаны так, что среда в кювете стала оптически однородной

отличие от опыта 5 полное внутреннее отражение происходит не скачком, а плавно так, что свет на небольшом участке между жидкостями распространяется по кривой линии.

Опыт 8. Криволинейное распространение света. Не изменяя положения лазера, небольшой лопаточкой размешивают жидкости в кювете, увеличивая толщину переходного слоя между ними. Обнаруживают, что в этом случае свет распространяется криволинейно, изгибаясь почти по дуге окружности сверху вниз (рис. 4.3).

Опыт 9. Прямолинейное распространение света в оптически однородной среде. Завершают предыдущий опыт перемешиванием жидкости до тех пор, пока среда в кювете не станет оптически однородной, и показывают, что свет в ней распространяется прямолинейно (рис. 4.4). Для объяснения опытов 8 и 9 используют принцип Гюйгенса, который, как известно, также состоит из двух частей: 1) каждая точка фронта волны, образованного в некоторый момент времени t_1 источником света, сама является источником вторичной сферической световой волны; 2) положение фронта волны, спустя малое время Δt , есть огибающая фронтов всех вторичных световых волн, построенных для этого момента времени $t_2 = t_1 + \Delta t$.

5. Задания по демонстрационным опытам

Описанная выше серия демонстрационных опытов по экспериментальному обоснованию основных законов физической оптики непосредственно предназначена для использования на одном или нескольких урочных или внеурочных занятиях в школе. Очевидно, каждый выполненный учителем опыт требует от обучающихся углубленного осмысления. Этот процесс можно стимулировать конкретными качественными и количественными задачами, ответы на вопросы которых школьники должны найти самостоятельно. Ниже для учителя физики представлена серия соответствующих демонстрационным опытам заданий и возможные варианты их выполнения. Под термином *учитель* здесь мы понимаем не только действующего педагога, но и будущих учителей физики, планирующих во время практик проведение в школах педагогических экспериментов, связанных с проблемой изучением основных законов оптики.

Задание 1. Прямолинейное распространение света. Разработайте эксперимент, убедительно доказывающий закон прямолинейного распространения света.

Вариант выполнения

1.1. Для доказательства прямолинейного распространения света в оптически однородной среде достаточно к распространяющемуся в ней узкому световому пучку приложить обычную линейку.

1.2. Более убедителен был бы опыт, подтверждающий существование лучей света. Для его выполнения световой пучок нужно пропустить через небольшое

отверстие и постепенно уменьшать размер отверстия до тех пор, пока не останется один луч, идущий по прямой.

Задание 2. Закон независимости световых пучков. Полистайте школьный учебник физики для 11 класса [4] и найдите физические явления, объяснение которых явно опирается на закон независимости световых пучков.

Вариант выполнения

2.1. При рассмотрении *интерференции механических волн* в учебнике анализируется воображаемая ситуация: «Если мы бросим в воду два камня, то образуются две круговые волны и можно заметить, что каждая волна проходит сквозь другую и ведет себя в дальнейшем так, как будто другой волны совсем не существовало» [4, с. 131]. Затем обсуждаются явления в области наложения волн и говорится о сложении колебаний, возбуждаемых каждой из них.

2.2. При изучении *интерференции света* закон независимости световых пучков явно не упоминается. В учебнике говорится о невозможности получения интерференционной картины «с помощью двух независимых источников света» [4, с. 206]. Здесь было бы уместно напомнить о независимости распространения световых пучков потому, что формулировки относительно максимумов и минимумов интерференционной картины («... волны усиливают друг друга <...> волны погасят друг друга» [4, с. 208]), могут создать у обучающихся образ взаимного влияния одного пучка на другой при сложении когерентных волн.

2.3. Независимость распространения световых пучков обнаруживается в опыте Юнга, с описания которого начинается изучение *дифракции света* [4, с. 213], однако специально этот факт в учебнике не отмечается.

Задание 3. Закон отражения света. Сфотографируйте на смартфон или планшет ход лазерного пучка, многократно отражающегося от передней и задней стенок плоскопараллельной прозрачной кюветы (рис. 2.1). Для этого фотокамеру нужно расположить над кюветой так, чтобы на ее дисплее получилось неискаженное изображение кюветы и распространяющегося в ней светового пучка.

3.1. Измерив по фотографии углы падения и отражения света, докажите, что в пределах погрешности закон отражения света выполняется.

3.2. Объясните, почему можно считать, что в опыте происходит явление полного внутреннего отражения.

3.3. Выясните, на границе раздела каких именно сред свет полностью отражается и докажите свою точку зрения.

3.4. Объясните, почему при наблюдении сбоку кюветы на световом пучке видны темные промежутки.

3.5. Предложите способ экспериментального доказательства существования полного внутреннего отражения света от передней и задней стенок кюветы.

Вариант выполнения

3.1. Условимся цифрой обозначать номер среды, в которой распространяется свет, и обозначим углы падения и отражения i_1 и i'_1 . Измеренные по фотографии на рис. 2.1 значения этих углов составляют: $i_1 = 59^\circ$, $i'_1 = 58^\circ$. При построении перпендикуляра к стеклянной стенке кюветы может быть допущена максимальная ошибка $0,5^\circ$. Углы падения и отражения измеряются относительно перпендикуляра примерно с такой же погрешностью. В итоге эти углы составляют $i_1 = (59 \pm 1)^\circ$ и $i'_1 = (58 \pm 1)^\circ$, следовательно, в пределах погрешности измерения их можно считать равными.

3.2. Абсолютные показатели преломления воды и воздуха равны: $n_1 = 1,33$ и $n_2 = 1,00$. Тогда синус предельного угла полного внутреннего отражения на границе вода–воздух: $\sin i_{\text{пр}} = n_2/n_1 = 0,75$, откуда $i_{\text{пр}} = 49^\circ$. Направляют пучок лазерного излучения на кювету так, чтобы угол его падения на стенку кюветы с внутренней ее стороны оказался меньше найденного значения. Наблюдают, что пучок испытывает несколько отражений внутри кюветы, но после каждого отражения его интенсивность уменьшается. Кроме того, на предметах, находящихся по бокам кюветы в лаборатории, обнаруживаются светлые пятна от вышедших из кюветы преломленных пучков. В опыте, показанном на рис. 2.1, изменение интенсивности пучка при отражениях незаметно, и видно, что световой пучок выходит из жидкости только в правом верхнем углу кюветы.

3.3. На рисунке оптически более плотную среду отделяют от оптически менее плотной плоскопараллельным однородным слоем. Используя законы преломления и отражения света, изображают ход светового луча, проходящего из первой среды во вторую, и убеждаются, что находящийся между ними плоскопараллельный слой третьей среды не меняет направления этого луча. Таким образом, предельный угол полного внутреннего отражения света, падающего из жидкости на стеклянную стенку кюветы, определяется только отношением показателей преломления воздуха и жидкости, которые разделены плоскопараллельным слоем стекла.

3.4. Падая на стенку кюветы, световой пучок из жидкости переходит в стекло, затем распространяется в стекле, отражается от границы стекло–воздух и преломляется обратно в воду. Стекло, в отличие от жидкости, не флуоресцирует, поэтому внутри кюветы пучок хорошо виден, а в ее стеклянной стенке — нет.

3.5. Ватку, смоченную водой, прикладывают к стенке кюветы в месте полного внутреннего отражения света. Интенсивность отраженного пучка становится заметно меньше интенсивности падающего.

Задание 4. Закон преломления света. Сфотографируйте на смартфон или планшет падающий, отраженный и преломленный призмой пучки лазерного излучения (рис. 3.1).

4.1. На фотографии постройте перпендикуляр к передней грани призмы в точке падения света, измерьте углы падения и отражения световых пучков, сделайте вывод.

4.2. Измерьте преломляющий угол призмы γ и угол δ , на который призма отклоняет падающий на нее пучок света.

4.3. Используя результаты измерений и значение показателя преломления подкрашенной флуоресцеином воды $n_1 = 1,33$, вычислите показатель преломления материала призмы n_2 для примененного в опыте излучения.

Вариант выполнения

4.1. Измеренные нами значения составили: угол падения $i_1 = (44 \pm 1)^\circ$, угол отражения $i_2 = (42 \pm 1)^\circ$, следовательно, в пределах неизбежных погрешностей угол отражения света равен углу падения.

4.2. Измеренный по фотографии преломляющий угол призмы $\gamma = 65^\circ$, но непосредственные измерения дают для этого угла значение 60° . Столь значительное расхождение объясняется неудачным ракурсом фотографирования: фотокамера была направлена на кювету не нормально, а под небольшим углом снизу вверх. Поэтому надо учитывать дополнительные погрешности при измерениях по фотографиям. Тем не менее оценочные измерения угла отклонения падающего пучка призмой дают значение $\delta = 23^\circ$.

4.3. По фотографии (рис. 3.1) видно, что в опыте реализован наиболее простой для расчетов случай, когда пучок внутри равнобедренной призмы распространяется параллельно ее основанию. Обозначим углы падения и преломления на передней грани призмы i_1 и i_2 , тогда углы падения и преломления на заднюю грань призмы равны i_2 и i_1 , причем $i_2 = \gamma/2$ и $i_1 = i_2 + \delta/2 = \gamma/2 + \delta/2$. Отсюда следует [1, с. 286–287]:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin(\gamma/2 + \delta/2)}{\sin \gamma/2}.$$

Пользуясь измеренными выше значениями $\gamma = 65^\circ$, $\delta = 23^\circ$ и принимая $n_1 = 1,33$, по этой формуле получаем показатель преломления призмы $n_2 = 1,72 \pm 0,08$. Оценка абсолютной погрешности выполнена методом границ на основании предположения о возможной ошибке измерения углов γ и δ , равной 1° . Табличное значение абсолютного показателя преломления стекла флинт 1,685 в пределах сделанной оценки погрешности совпадает с полученным значением.

Задание 5. Полное внутреннее отражение света. Научное познание в физике осуществляется в соответствии со схемой *факты* \rightarrow *модель* \rightarrow *следствия* \rightarrow *эксперимент*. Проанализируйте выполненную на уроках серию опытов 1–5 и выделите экспериментальные факты, на которых построена теоретическая модель, следствия этой модели и их экспериментальную проверку.

Вариант выполнения

Факты: 1) свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно; 2) пучки света, пересекаясь, не влияют друг на друга; 3) на плоской границе раздела двух сред свет в общем случае частично отражается и частично преломляется так, что выполняются законы отражения и преломления света; 4) измеренный по фотографии угол падения света, при котором наблюдается полное внутреннее отражение, равен 72° .

Модель математическая: 1) отношение синусов углов падения и преломления есть величина постоянная, которая называется относительным показателем преломления второй среды относительно первой; 2) относительный показатель преломления относительно вакуума является абсолютным; 3) относительный показатель преломления равен отношению абсолютных показателей преломления второй и первой сред.

Модель физическая (принцип Гюйгенса): 1) свет представляет собой волну, распространяющуюся в среде со скоростью v , равной отношению скорости света c в вакууме к абсолютному показателю преломления n среды: $v = c/n$; 2) каждая точка, до которой дошла эта волна, сама является источником вторичной сферической волны; 3) огибающая всех вторичных волн в данный момент времени дает положение фронта волны в этот момент времени.

Следствия: 1) принцип Гюйгенса объясняет закон независимости световых пучков, позволяет теоретически вывести законы отражения и преломления, объясняет криволинейное распространение света в оптически неоднородных средах и предсказывает существование дифракции света; 2) однако этот принцип не объясняет прямолинейности световых пучков в однородных средах; 3) математическая модель преломления света предсказывает существование явления полного внутреннего отражения света.

Эксперимент доказывает, что при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную существует предельный угол падения, при равенстве или превышении которого свет полностью отражается обратно в первую среду. Действительно, в опыте 5 абсолютные показатели преломления воды и воздуха $n_1 = 1,33$ и $n_2 = 1,00$, поэтому предельный угол $i_{\text{пр}} = \arcsin n_2/n_1 = 49^\circ$. Измерения угла падения по фотографии (рис. 3.2) дают значение $i_1 = 72^\circ$. Таким образом, следствие теоретической модели подтверждается частным экспериментом.

Задание 6. Преломление света на границе раздела между смешивающимися жидкостями. В школьном учебнике нередко встречаются рисунки, на которых изображены луч, падающий на границу раздела сред, и преломленный луч, а отраженный луч вообще отсутствует. Объясните, насколько соответствуют такие рисунки реальным физическим явлениям.

Вариант выполнения

При падении естественного пучка света на плоскую границу раздела двух оптически однородных прозрачных сред всегда свет отражается от этой границы частично или полностью. Поэтому рисунки 7.12, 7.13, 7.15, 7.16, 7.17, 7.23, 7.24 и 7.25 учебника [4], если к ним нет специальных оговорок, учат не тому, что нужно. Эксперимент показывает, что отраженный пучок естественного света отсутствует только тогда, когда плоская граница раздела оптически однородных сред размыта и представляет собой оптически неоднородный слой.

Задание 7. Полное внутреннее отражение света от границы раздела между смешивающимися жидкостями. По фотографии, подобной приведенной на рис. 4.2, измерьте угол падения света на границе раздела двух смешивающихся жидкостей. Зная показатели преломления этих жидкостей (например, $n_1 = 1,38$ и $n_2 = 1,33$), вычислите величину предельного угла при полном внутреннем отражении света. Сделайте выводы из эксперимента и теории.

Вариант выполнения

Нужно остро отточенным карандашом посередине падающего и отраженного пучков света провести прямые линии (лучи), продлив их за точку пересечения. Измерение тупого угла между этими прямыми дает значение $\alpha = 154^\circ$, следовательно, углы падения и отражения равны $i_1 = i'_1 = \alpha/2 = 77^\circ$. Чтобы проверить полученное значение, нужно через точку пересечения лучей провести перпендикуляр к поверхности жидкости в кювете. Непосредственное измерение углов падения и отражения показывает, что в пределах погрешностей эти углы равны полученному ранее значению. Предельный угол полного внутреннего отражения для резкой границы между раствором соли и пресной водой определяется условием $\sin i_{\text{пр}} = n_2/n_1 = 1,33/1,38 = 0,96$, откуда $i_{\text{пр}} = 74,5^\circ$. Измеренный по рис. 4.2 угол падения света $i_1 = 77^\circ$, то есть всего

на $2,5^\circ$ больше вычисленного значения предельного угла. Поэтому можно считать, что в опыте свет падает на резкую границу раздела между смешивающимися жидкостями под углом, близким к предельному углу полного внутреннего отражения.

Задание 8. Криволинейное распространение света. По фотографии, подобной той, которая приведена на рис. 4.3, измерьте угол падения света на слой плавного изменения показателя преломления. Сопоставьте полученное значение с тем, которое найдено в предыдущем задании. Определите показатель преломления того слоя оптически неоднородной среды, от которого происходит полное внутреннее отражение света. Сделайте обобщающий вывод.

Вариант выполнения

В опытах 7 и 6 свет падает на оптически неоднородный слой и отражается от него под одним и тем же углом $i_1 = i'_1 = 77^\circ$, близким к предельному. Приближенно будем считать, что $i_1 = i_{\text{пр}} = 77^\circ$. Из закона преломления (опыт 4) $\sin i_{\text{пр}} = n_2/n_1$, поэтому $n_2 = n_1 \cdot \sin i_{\text{пр}} = 1,380 \cdot \sin 77^\circ = 1,345$. Это значение ближе к показателю преломления воды, чем раствора соли. Поэтому опыт свидетельствует в пользу того, что полное внутреннее отражение происходит от нижней границы пресной воды. Обобщая этот результат, приходят к выводу, что оптически неоднородный слой между двумя однородными средами не изменяет предельного угла полного внутреннего отражения при переходе света через этот слой из оптически более плотной в оптически менее плотную среду (рис. 5).

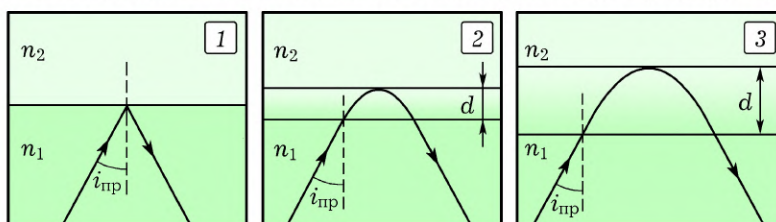


Рис. 5. Полное внутреннее отражение света: 1 — резкая граница между смешивающимися жидкостями; 2 — в слое между жидкостями показатель преломления плавно уменьшается от n_1 до n_2 ; 3 — толщина переходного слоя увеличена; во всех этих случаях предельный угол остается неизменным [10]

Задание 9. Прямолинейное распространение света в оптически однородной среде. Пусть в переходном слое между раствором соли и пресной водой показатель преломления жидкости в вертикальном направлении y уменьшается от значения $n_1 = 1,38$ до $n_2 = 1,33$.

9.1. Считая для простоты, что показатель преломления в переходном слое линейно зависит от вертикальной координаты y , постройте график этой зависимости.

9.2. Пользуясь принципом Гюйгенса, изобразите примерный ход узкого светового пучка, входящего в оптически неоднородный слой горизонтально. Попробуйте в натурном эксперименте, уменьшая ширину светового пучка, получить луч света, чтобы убедиться, что он прямолинеен.

Вариант выполнения

9.1. На рис. 6 слева показан лежащий в бесконечности точечный источник света. Параллельный пучок от этого источника входит в кювету с оптически неоднородной жидкостью. Справа от кюветы показан график зависимости показателя преломления жидкости от координаты: $n = n(y)$. Скорость света в жидкости v равна отношению скорости света в вакууме c к абсолютному показателю преломления n жидкости: $v(y) = c/n(y)$. Последовательно применяя принцип Гюйгенса, нетрудно убедиться, что световой пучок изгибается в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления жидкости.

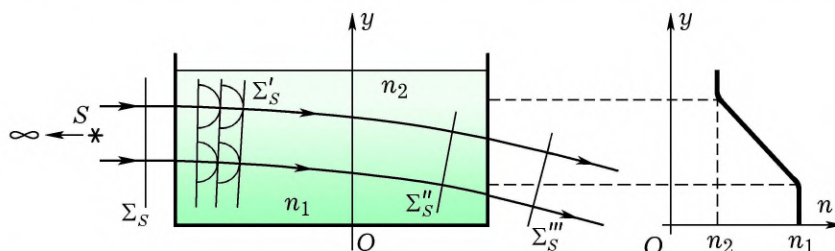


Рис. 6. Принцип Гюйгенса объясняет криволинейное распространение света в оптически неоднородной среде и позволяет определить радиус кривизны светового пучка [9]

9.2. Излучение полупроводникового лазера направляют в кювету с водой, подкрашенной флюоресцеином, и наблюдают относительно широкий световой пучок (рис. 7.1). Перед кюветой располагают полностью открытую раздвижную щель на диске (например, от проекционного аппарата ФОС–115) и постепенно уменьшают ее ширину. При этом наблюдают, что вначале выходящий из щели пучок тоже сужается и яркость его снижается, так как уменьшается энергия света, прошедшего через щель (рис. 7.2). Но затем снижение яркости пучка продолжается, а его ширина не только не уменьшается, но напротив, увеличивается (рис. 7.3). Обнаруженное на опыте явление называется дифракцией и показывает, что лучей света в природе нет, несмотря на то, что в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно.

6. Заключение

Научная новизна дидактического исследования, результаты которого представлены в этой работе, состоит в следующем:

- 1) обнаружено отсутствие в школьных учебниках физики убедительного и непротиворечивого обоснования общепринятых фундаментальных основ физической оптики;
- 2) выявлена методологическая ошибка учебника физики для 11 класса [4], который общезначимый закон прямолинейного распространения света относит исключительно к геометрической оптике; отмечены недостатки методики изложения физических основ оптики в этом учебнике;
- 3) показана необходимость и возможность экспериментального доказательства справедливости основных законов оптики в демонстрационных опытах на школьных уроках;

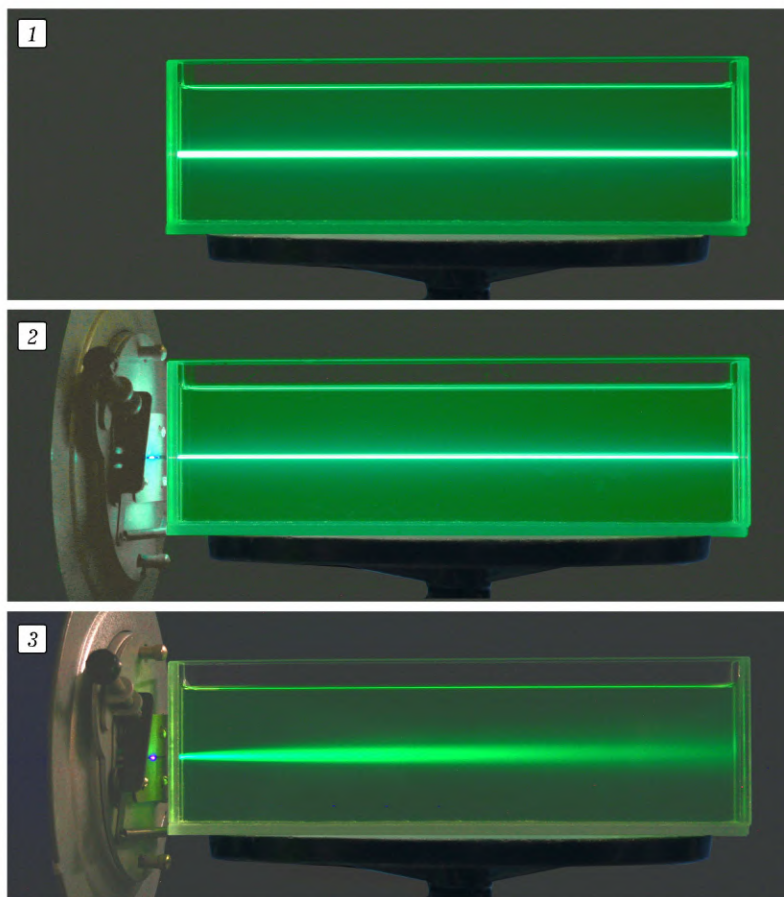


Рис. 7. Эксперимент показывает, что бесконечно узких световых лучей в природе нет, так как существует явление дифракции света

4) разработано минимальное учебное оборудование, обеспечивающее постановку современных демонстрационных опытов по фундаментальным основам оптики;

5) впервые предложена методика экспериментального доказательства справедливости фундаментального физического закона прямолинейности распространения света в оптически однородных средах;

6) впервые разработана целостная система демонстрационных опытов по экспериментальному обоснованию основных законов оптики, соответствующая логике научного познания и удовлетворяющая дидактическим требованиям простоты, доступности, доказательности и безопасности.

Практическая значимость выполненного дидактического исследования состоит в том, что его результаты непосредственно могут быть использованы при изучении элементарной физики в средних школах [11] и педагогических вузах [12].

Исследование выполнено на базе Федеральной инновационной площадки «Школа учебного физического эксперимента» по проекту «Методология создания и внедрения современных учебных физических приборов и опытов для урочной и внеурочной деятельности по физике в средней школе и в педагогическом вузе» (ХУА-2024-0030), который реализуется при финансовой поддержке Министерства просвещения Российской Федерации в рамках государственного задания (дополнительное соглашение Министерства просвещения Российской Федерации и ФГБОУ ВО «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет имени В.Г.Короленко» № 073-03-2024-058/1 от 13.02.2024 к соглашению № 073-03-2024-058 от 19.01.2024, регистрационный № НИОКТР 1023040600021-1-5.3.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Физматлит, 2003. — 848 с.
2. Физика: 8 класс: базовый уровень: учебник / А. В. Перышкин. — М.: Дрофа, 2019. — 240 с.
3. Физика: 9-й класс: базовый уровень: учебник / И. М. Перышкин, Е. М. Гутник, А. И. Иванов, М. А. Петрова. — Москва: Просвещение, 2024. — 350 с.
4. Физика: 11-й класс: базовый и углубленный уровни: учебник / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, В. М. Чаругин; под ред. Н. А. Парфентьевой. — Москва: Просвещение, 2024. — 432 с.
5. Федеральный государственный образовательный стандарт среднего общего образования. — URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-soo/> (дата обращения: 12.05.2024).
6. Разумовский В. Г. Развитие творческих способностей учащихся в процессе обучения физике. Пособие для учителей. — М.: Просвещение, 1975. — 272 с.
7. Учебное оборудование для кабинетов физики общеобразовательных учреждений / Ю. И. Дик, Ю. С. Песоцкий, Г. Г. Никифоров и др.; под ред. Г. Г. Никифорова. — М.: Дрофа, 2005. — 396 с.
8. Майер В. В., Вараксина Е. И., Васильев И. А., Курбоналиев К. М. Оборудование для учебных опытов по криволинейному распространению света // Учебная физика. — 2021. — № 4. — С. 20–23.
9. Майер В. В., Вараксина Е. И., Курбоналиев К. М. Экспериментальное обоснование принципа Гюйгенса // Учебная физика. — 2021. — № 4. — С. 24–30.
10. Майер В. В. Свет в оптически неоднородной среде: учебные исследования. — М.: Физматлит, 2007. — 232 с.
11. Майер В. В., Курбоналиев К. М. Полное внутреннее отражение света и современная градиентная оптика на школьном внеурочном занятии // Учебная физика. — 2022. — № 1. — С. 9–13.
12. Майер В. В., Вараксина Е. И. Основы геометрической и градиентной оптики в демонстрационных опытах // Настоящее и будущее физико-математического образования: материалы докладов VI всероссийской научно-практической конференции. 01 ноября 2023 г. / отв. ред. Ю. А. Сауров. — Киров: Изд-во «Радуга-ПРЕСС», 2023. — С. 30–36.

Глазовский государственный
инженерно-педагогический
университет имени В. Г. Короленко

Поступила в редакцию 01.03.24.