

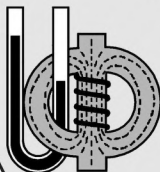
ISSN 2307-5457

*Primum
inter pares*

Материалы XXVI Всероссийской
научно-практической конференции

„Учебный физический эксперимент:
Актуальные проблемы. Современные
решения“

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ



**УЧЕБНАЯ
ФИЗИКА**

Октябрь - декабрь 2021 №4

Издается с января 1997 года

СОДЕРЖАНИЕ

Основная школа

- В. В. Майер ПРостое и надежное колесо Франклина 3
Ю. А. Корнев

Старшая школа

- В. В. Майер УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ
Е. И. Вараксина ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА 8

- В. В. Майер ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЧЕБНЫХ
Е. И. Вараксина ОПЫТОВ ПО КРИВОЛИНЕЙНОМУ
И. А. Васильев РАСПРОСТРАНЕНИЮ СВЕТА 20
К. М. Курбоналиев

Высшая школа

- В. В. Майер ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
Е. И. Вараксина ПРИНЦИПА ГЮЙГЕНСА 24
К. М. Курбоналиев

- В. В. Майер ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭЛЛИПСА В ПАРАБОЛУ 31
А. А. Попова

Компьютер в эксперименте

- С. В. Марков ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКА ХОЛЛА
 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
 В НАТУРНОМ КОМПЬЮТЕРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ 36

- Е. И. Вараксина ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ НАГЛЯДНОГО
О. Л. Соколова ОБРАЗА ИНТЕРФЕРЕНЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН ... 44

УДК 372.853:535

В. В. Майер, Е. И. Вараксина, К. М. Курбоналиев
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПРИНЦИПА ГЮЙГЕНСА

Описана серия демонстрационных опытов по распространению света в оптически однородной и неоднородной жидкостях. В опытах сравниваются оценки радиуса кривизны светового пучка двумя способами: непосредственным измерением параметров искривленного пучка и вычислением на основе принципа Гюйгенса.

Ключевые слова: принцип Гюйгенса, оптически неоднородная среда, градиент показателя преломления, радиус кривизны светового пучка.

1. Введение

Принцип Гюйгенса рассматривается во всех вузовских учебниках оптики. Для подтверждения справедливости этого принципа его обычно используют в теоретическом объяснении законов отражения и преломления света [1]. Мы предлагаем доказать применимость принципа Гюйгенса в полуколичественном демонстрационном эксперименте по распространению света в оптически неоднородной жидкости. Такие эксперименты подробно описаны в книгах [2, 3]. Задачей настоящей работы является представление серии кратковременных демонстрационных опытов, дающих убедительное экспериментальное обоснование принципа Гюйгенса.

2. Демонстрация криволинейного распространения света

Подготовка демонстрационной установки для опытов по криволинейному распространению света в оптически неоднородной жидкости подробно описана в предыдущей статье этого номера журнала [4]. Демонстрацию опытов проводят в следующем порядке.

Опыт 1. Прямолинейное распространение света. На дно кюветы наливают подкрашенную флуоресцеином воду и направляют в нее под небольшим углом или горизонтально узкий пучок лазерного излучения (рис. 1). Обучающиеся наблюдают в воде яркий прямолинейный пучок зеленого цвета и делают вывод, что в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно.



Рис. 1

Опыт 2. Полное внутреннее отражение света. Направляют световой пучок через боковую стенку кюветы сначала снизу вверх, а затем сверху вниз так, чтобы свет отражался от верхней и нижней поверхностей слоя воды. Наблюдают несколько отражений от этих границ, при которых яркость отраженного пучка практически не меняется (рис. 2). Делают вывод: при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, если углы падения превышают предельный, свет испытывает полное внутреннее отражение. Обращают внимание на слабые пучки света, идущие параллельно основному пучку, и объясняют их отражениями света на границах вода–стекло и стекло–вода.

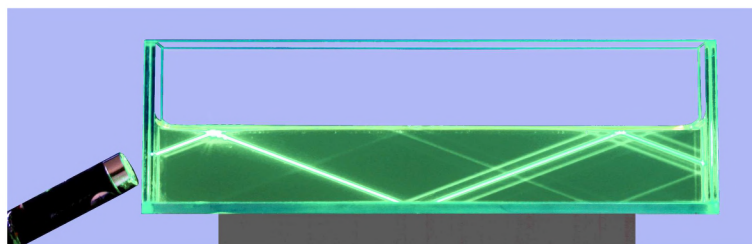


Рис. 2

Опыт 3. Преломление и отражение света на границе раздела сред. В закрепленную в штативе воронку наливают раствор поваренной соли. Слегка ослабив зажим, заполняют шланг жидкостью и вновь пережимают шланг. Опускают конец шланга в воду до дна кюветы и ослабляют зажим. Перелив на дно кюветы нужный объем раствора соли, пережимают шланг и достают его конец из кюветы. Эти действия необходимы для получения достаточно узкой границы раздела между смешивающимися жидкостями.

Сначала сверху, а затем снизу направляют на границу раздела сред пучок лазерного излучения и наблюдают, что свет, проходя че-

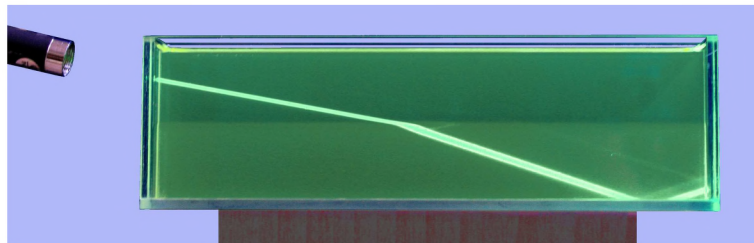


Рис. 3

рез эту границу, преломляется на ней (рис. 3). Однако отраженного пучка в этом опыте нет. Значит при переходе даже через тонкий слой оптически неоднородной жидкости свет преломляется, но не отражается. Напоминают, что при прохождении света через границы между твердым телом и жидкостью или газом в общем случае свет частично преломляется и частично отражается.

Опыт 4. Полное внутреннее отражение света от оптически неоднородного слоя. Постепенно увеличивают угол падения света из раствора соли на границу раздела жидкостей. Обнаруживают, что при достаточно большом угле падения преломленный пучок исчезает совсем, и свет вообще не выходит из первой среды, то есть происходит его полное внутреннее отражение (рис. 4). Наблюдения показывают, что возле области падения пучка на границу между жидкостями свет распространяется криволинейно. Если наблюдения производить в течение примерно часа, то видно, что с течением времени радиус кривизны светового пучка увеличивается.

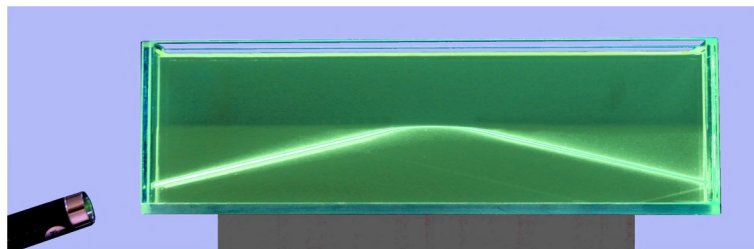


Рис. 4

Опыт 5. Измерение радиуса кривизны искривленного пучка. Продолжают предыдущий опыт, устанавливая такой угол падения света на слой неоднородной жидкости, когда траектория светового пучка изогнута максимально и симметрична относительно верти-

кальной оси, проходящей через середину кюветы. Параллельно кювете устанавливают линейку с миллиметровыми делениями и обучающиеся фотографируют установку на свои смартфоны (рис. 5). По полученным фотографиям они определяют радиус кривизны светового пучка.

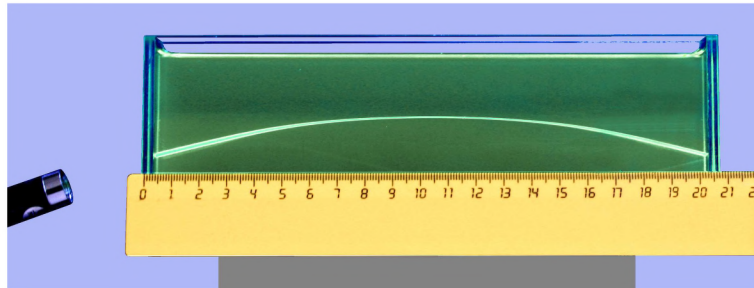


Рис. 5

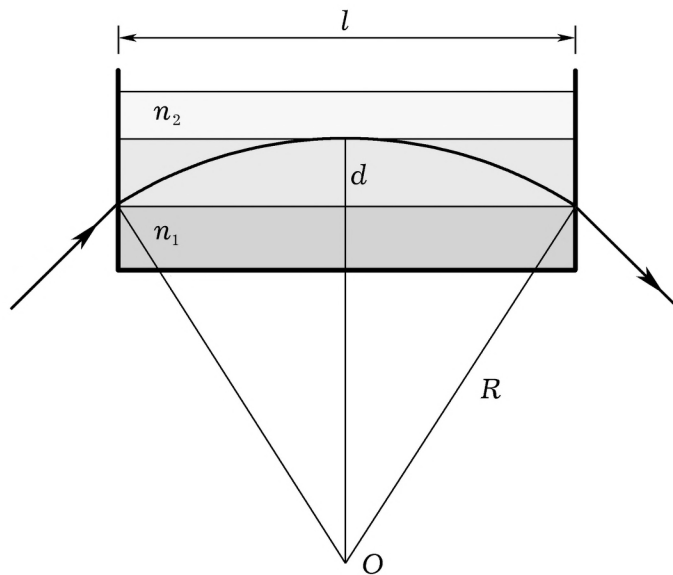


Рис. 6

Для этого вначале схематически изображают ход луча в оптически неоднородном слое жидкости (рис. 6). Пользуясь теоремой Пифагора, записывают:

$$R^2 = (R - d)^2 + (l/2)^2 = R^2 - 2Rd + d^2 + \frac{l^2}{4}. \quad (1)$$

Пренебрегая сравнительно малой величиной d^2 , отсюда получают, что радиус кривизны светового пучка равен:

$$R = \frac{l^2}{8d}. \quad (2)$$

3. Экспериментальное обоснование принципа Гюйгенса

Принцип Гюйгенса можно сформулировать так: каждая точка, до которой в некоторый момент времени дошла световая волна, сама становится источником вторичной сферической световой волны; положение фронта волны в следующий момент времени есть огибающая всех вторичных волн, построенных для этого момента.

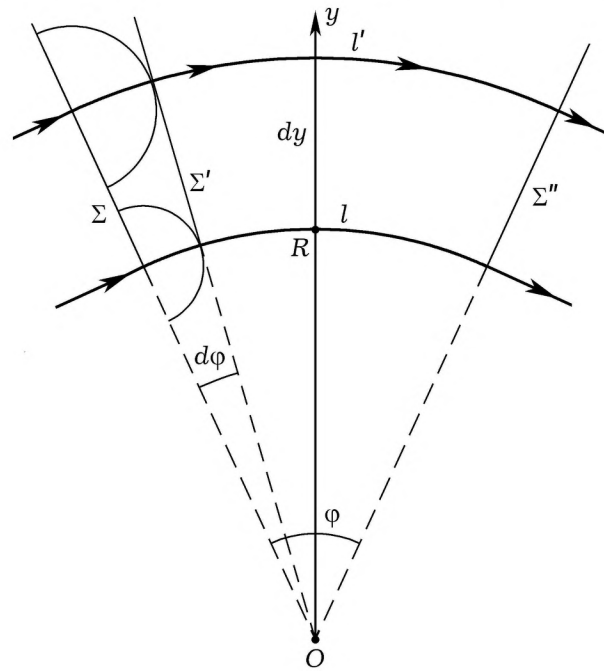


Рис. 7

Чтобы получить экспериментальное обоснование этого принципа, рассмотрим распространение пучка света небольшой ширины dy в оптически неоднородной среде, показатель преломления n которой уменьшается в направлении вертикальной оси Oy (рис. 7). Пусть на уровне с координатой $y = R$ показатель преломления среды равен n , а на уровне $y = R + dy$ он равен $n' = n - dn$. Вектор скорости (быстроты) изменения показателя преломления вдоль направления наибольшего его увеличения называют *градиентом*.

Оптически неоднородную среду будем характеризовать *модулем градиента показателя преломления*:

$$k = \frac{dn}{dy}. \quad (3)$$

Если в начальный момент времени $t = 0$ плоский фронт волны находится в положении Σ , то согласно принципу Гюйгенса через небольшой промежуток времени dt огибающая вторичных волн займет положение Σ' . Значит, фронт волны повернется на малый угол $d\varphi$, а вместе с ним на такой же угол повернутся перпендикулярные фронту световые лучи. Отсюда следует, что в оптически неоднородной среде свет распространяется криволинейно, изгибаясь в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления. Это подтверждается выполненным экспериментом.

Теперь, пользуясь принципом Гюйгенса, определим радиус кривизны светового пучка. Будем считать, что за время t фронт волны Σ перешел в положение Σ'' , симметричное первоначальному относительно оси Oy . Скорости света в нижней и верхней частях пучка равны соответственно:

$$v = \frac{c}{n}, \quad v' = \frac{c}{n'} = \frac{c}{n - dn}, \quad (4)$$

где c — скорость света в вакууме. Отсюда время распространения света на участке между Σ и Σ'' :

$$t = \frac{l}{v} = \frac{l'}{v'}.$$

Подставляя сюда выражения скоростей v и v' (4) и производя сокращение на c , получаем:

$$nl = (n - dn)l'. \quad (5)$$

Так как длины дуг окружностей равны произведениям их радиусов на соответствующие углы $l = R\varphi$ и $l' = (R + dy)\varphi$, то из предыдущей формулы имеем:

$$nR = (n - dn)(R + dy) = nR + ndy - Rdn - dndy.$$

Пренебрегая в этой формуле малой величиной $dndy$, получаем: $Rdn = ndy$. Отсюда искомый радиус кривизны светового пучка

$$R = \frac{n}{dn/dy} = \frac{n}{k}. \quad (6)$$

Таким образом, чем больше градиент показателя преломления среды, тем меньше радиус кривизны пучка и тем сильнее он искривляется.

Чтобы убедиться в справедливости принципа Гюйгенса, достаточно сравнить значения радиуса кривизны светового пучка, вычисленные по формулам (2) и (6). Измеренные рефрактометром показатели преломления водного раствора поваренной соли и чи-

стой воды равны $n_1 = n = 1,380$ и $n_2 = n' = 1,333$ так, что $\Delta n = 0,047$ (рис. 6 и 7). Пользуясь масштабной линейкой, по фотографии (рис. 5) определяют, что $l = 200$ мм и $d = dy = 13$ мм. Подстановка этих данных в формулу (2) дает:

$$R = \frac{l^2}{8d} = \frac{0,2^2}{8 \cdot 13 \cdot 10^{-3}} = 0,38 \text{ м.} \quad (7)$$

При использовании формулы (6) получают:

$$R = \frac{n}{dn/dy} = \frac{1,380 \cdot 13 \cdot 10^{-3}}{0,047} = 0,38 \text{ м.} \quad (8)$$

Таким образом, использованные в демонстрационном эксперименте различные методы определения радиуса кривизны светового пучка дают с достаточной для учебного эксперимента точностью близкие результаты. Это показывает, что принцип Гюйгенса верно объясняет криволинейное распространение света в оптически неоднородной среде. Тем самым принцип Гюйгенса получает убедительное экспериментальное обоснование.

4. Заключение

В статье показано, как в демонстрационном опыте по экспериментальному обоснованию принципа Гюйгенса работает цикл научного познания. Вначале обучающиеся убеждаются в существовании явления криволинейного распространения света и определяют радиус кривизны светового пучка. На основе этих экспериментальных фактов конструируется физическая модель явления, опирающаяся на принцип Гюйгенса. Далее строится математическая модель явления, следствием которой является выражение радиуса кривизны луча через градиент показателя преломления. Затем при использовании экспериментальных результатов вычисляется радиус кривизны пучка на основе модельных представлений. Совпадение в пределах погрешностей измерения получившегося значения с экспериментальным свидетельствует в пользу справедливости принципа Гюйгенса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Физматлит, 2003. — 848 с.
2. Майер В. В. Простые опыты по криволинейному распространению света. — М.: Наука, 1984. — 128 с.
3. Майер В. В. Свет в оптически неоднородной среде: учебные исследования. — М.: Физматлит, 2007. — 232 с.
4. Майер В. В., Варакина Е. И., Васильев И. А., Курбоналиев К. М. Оборудование для учебных опытов по криволинейному распространению света // Учебная физика. — 2021. — № 4. — С. 20–23.

Глазовский государственный
педагогический институт

Поступила в редакцию 01.12.21.

ABSTRACTS

Mayer V. V., Kornev Yu. A. A simple and reliable Franklin wheel. A simple method of making a Franklin wheel is described, accessible even to those students who are just starting to study physics. The idea of this method can become the basis of a student project, the final stage of which is the demonstration of the Franklin wheel in a school lesson. *Keywords:* electrostatics, Franklin wheel, student project, demonstration experiment.

Mayer V. V., Varaksina E. I. Arrangement and operating principle of piezoelectric generator. The arrangement and the principle of operation of the piezoelectric generator are considered. A series of simple experiments on the educational study of a piezoelectric high voltage source is described. The article is a didactic resource of project activity intended for high school students and teachers. *Keywords:* piezoelectric generator, electrometer, simple experiments, educational research, didactic resource.

Mayer V. V., Varaksina E. I., Vasiliev I. A., Kurbonaliev K. M. Equipment for educational experiments on curved light propagation. The equipment and procedure for preparing a demonstration experiment on the curvilinear propagation of light in an optically inhomogeneous medium formed by a layer between two miscible liquids are described. *Keywords:* glass cuvette, water, saturated salt solution, fluorescein, semiconductor laser.

Mayer V. V., Varaksina E. I., Kurbonaliev K. M. Experimental substantiation of the Huygens principle. A series of demonstration experiments on the propagation of light in an optically homogeneous and inhomogeneous liquids is described. In experiments, estimates of the radius of curvature of a light beam are compared in two ways: by direct measurement of the parameters of a curved beam and calculation based on the Huygens principle. *Keywords:* Huygens principle, optically inhomogeneous medium, refractive index gradient, radius of curvature of the light beam.

Mayer V. V., Popova A. A. Transformation of an ellipse into a parabola. The transition from the ellipse equation in canonical form to the parabola equation is considered. This makes it possible to implement a unified approach when studying the optical properties of an ellipse and a parabola. *Keywords:* equation of ellipse in canonical form; equation of second-order curve related to its vertex; equation of parabola.

Markov S. V. Scientific research of the magnetic fields using the Hall generator in a full-scale computer experiment. The electromagnetic induction research was examined. A graph of the magnetic induction and the resulting EMF of induction in the loop were built. The experiment was worked for lab out of the quantitative study of the law of electromagnetic induction. *Keywords:* a full-scale computer experiment, an electromagnetic induction, a lab, Hall generator, to visualize electromagnetic processes.

Varaksina E. I., Sokolova O. L. The problem of forming a visual image of interference of mechanical waves. The existence of the problem of forming a visual image of interference is substantiated. The possibility of creating such an image by means of an educational physical experiment, graphic and photographic illustrations in school textbooks is analyzed. At the initial stage of studying interference, it is proposed to supplement the educational physical experiment with interactive computer animation simulating the superposition

of circular waves propagating from two point sources. *Keywords*: interference, wave theory of light, visual aids, educational physical experiment.

Saurov Yu. A. On the modernity of the development of creative abilities (to the 50th anniversary of the defense of the doctoral dissertation by V. G. Razumovsky). Memory is our great and eternal resource. It sets and preserves patterns of activity in the past for the present and the future. The defense of the dissertation is not only personally significant, but socially and socially significant. The defense of the doctoral dissertation by V. G. Razumovsky has so far directly or indirectly influenced the development of methods of teaching physics. This article outlines the essential features of this study. *Keywords*: creativity, dissertation, history of physics teaching methods.

Varaksina E. I. Illustrative and evidential educational physical experiment. Our articles published in the journals «Educational Physics» No. 1 and No. 3 show the need for systematic research activities of subjects of physical education in the field of educational physical experiment. To formulate the purpose of this activity, we propose to turn to the concepts of *illustrative* and *evidential* experiment. *Keywords*: educational physical experiment, research, conclusiveness, illustrativity.