



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный  
технический университет

---

---

Кафедра «Физика»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ  
РАСТВОРА СОЛИ  
ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОМЕТРА**

*Методические указания к лабораторной работе*

Минск  
БНТУ  
2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Физика»

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА СОЛИ ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОМЕТРА

Методические указания к лабораторной работе по физике  
для студентов строительных специальностей

Минск  
БНТУ  
2014

УДК 535.514-4 (076.5)

ББК 22.343я7

О-62

Составители:

*А. А. Иванов, В. А. Потачиц, И. А. Климович, С. В. Попко,  
Е. В. Журавкевич*

Рецензенты:

*В. В. Асташинский, Ю. В. Развин*

В работе подробно изложены основные законы геометрической оптики. Особое внимание уделено рассмотрению явления полного внутреннего отражения. Подробно описан принцип действия рефрактометра и метод определения концентрации раствора соли в воде.

© Белорусский национальный  
технический университет, 2014

- Цель работы:** а) изучить законы преломления света;  
б) ознакомиться с устройством и принципом работы рефрактометра;  
в) определить концентрацию раствора соли с помощью рефрактометра.

**Приборы и принадлежности:** рефрактометр, набор растворов соли с различной концентрацией, пипетка, салфетка.

### **Геометрическая оптика и ее законы**

Геометрическая оптика – раздел оптики, изучающий распространение света в среде без учета его волновой природы. Законы геометрической оптики верны, если среда не содержит неоднородностей, сравнимых с длиной волны, и если волны некогерентны, т.е. отсутствует интерференция.

Геометрическая оптика основана на следующих законах.

**Закон прямолинейного распространения света:** в прозрачной однородной среде свет распространяется по прямым линиям. В связи с законом прямолинейного распространения света появилось понятие **световой луч**, которое имеет геометрический смысл как линия, вдоль которой распространяется свет. Реальный физический смысл имеют световые пучки конечной ширины. Световой луч можно рассматривать как ось светового пучка. Поскольку свет, как и всякое излучение, переносит энергию, то можно говорить, что световой луч указывает направление переноса энергии световым пучком.

**Закон независимого распространения лучей** – второй закон геометрической оптики, который утверждает, что световые лучи распространяются независимо друг от друга. Так, например, при установке непрозрачного экрана на пути пучка световых лучей экранируется (исключается) из состава пучка некоторая его часть. Однако по свойству независимости необходимо считать, что действие лучей, оставшихся незэкранированными, от этого не изменится. То есть предполагается, что лучи не влияют друг на друга и распространяются так, как будто других лучей, кроме рассматриваемых, не существует.

**Закон отражения света** устанавливает изменение направления хода светового луча в результате встречи с отражающей (зеркальной) поверхностью: падающий и отражённый лучи лежат в одной плоскости с нормалью к отражающей поверхности в точке падения, и эта нормаль делит угол между лучами на две равные части (рис. 1). Широко распространённая, но менее точная формулировка «угол падения равен углу отражения» не указывает точное направление отражения луча.

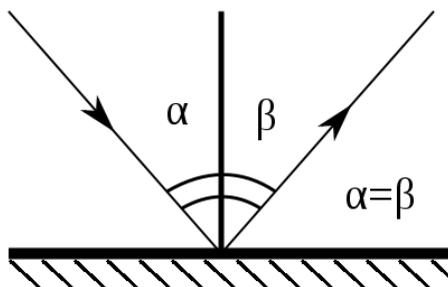


Рис. 1. Ход светового луча при отражении от зеркальной поверхности

Этот закон является следствием применения принципа Ферма к отражающей поверхности и, как и все законы геометрической оптики, выводится из законов волновой оптики. Закон справедлив не только для идеально отражающих поверхностей, но и для границы двух сред, частично отражающей свет. В этом случае, равно как и закон преломления света, он ничего не утверждает об интенсивности отражённого света.

### **Механизм отражения**

В классической электродинамике свет рассматривается как электромагнитная волна, которая описывается уравнениями Максвелла. Световые волны, падающие на диэлектрик, вызывают малые колебания дипольного момента в отдельных атомах, в результате чего каждая частица излучает вторичные волны во всех направлениях (как антенна-диполь). Все эти волны складываются и в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля дают зеркальное отражение и преломление.

При попадании электромагнитной волны на проводящую поверхность возникают колебания электронов (электрический ток), электромагнитное поле которого стремится компенсировать это воздействие, что приводит к практически полному отражению света.

В зависимости от резонансной частоты колебаний в молекулярной структуре вещества при отражении диполями излучается волна определенной частоты (определенного цвета). Так предметы приобретают цвет.

**Закон Снеллиуса** (также **Снелля** или **Снелла**) описывает преломление света на границе двух прозрачных сред. Также применим и для описания преломления волн другой природы, например звуковых. Закон был открыт в начале XVII века голландским математиком Виллебрордом Снеллиусом. Несколько позднее опубликован (и, возможно, независимо переоткрыт) Рене Декартом. Он утверждает, что на границе раздела двух любых прозрачных сред луч преломляется, причем луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр в точке падения к границе раздела сред лежат в одной плоскости (рис. 2), а угол падения света на поверхность связан с углом преломления соотношением

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r .$$

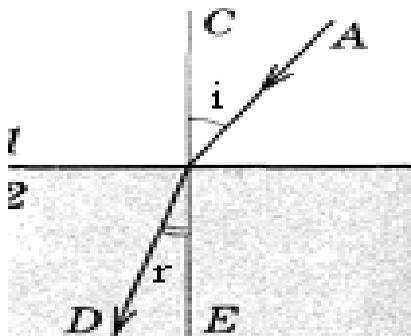


Рис. 2. Преломление света на границе раздела двух сред

Здесь:

- $n_1$  – абсолютный показатель преломления среды, из которой свет падает на границу раздела;

- $i$  – угол падения света – угол между падающим на поверхность лучом и нормалью к поверхности;
- $n_2$  – абсолютный показатель преломления среды, в которую свет попадает, пройдя границу раздела;
- $r$  – угол преломления света – угол между прошедшим через поверхность лучом и нормалью к поверхности.

Если  $n_1 > n_2$ , имеет место полное внутреннее отражение (преломленный луч отсутствует, падающий луч полностью отражается от границы раздела сред).

Следует заметить, что в случае анизотропных сред (например, кристаллов с низкой симметрией или механически деформированных твердых тел) преломление подчиняется несколько более сложному закону. При этом возможна зависимость направления преломленного луча не только от направления падающего, но и от его поляризации.

Также следует заметить, что закон Снеллиуса не описывает соотношение интенсивностей и поляризаций падающего, преломленного и отраженного лучей, для этого существуют более детальные формулы Френеля.

Закон Снеллиуса хорошо определен для случая геометрической оптики, то есть в случае, когда длина волны достаточно мала по сравнению с размерами преломляющей поверхности, и, вообще говоря, работает в рамках приближенного описания, каковым и является геометрическая оптика.

**Принцип Ферма (принцип наименьшего времени Ферма)** в геометрической оптике – постулат, предписывающий лучу света двигаться из начальной точки в конечную точку по пути, минимизирующему (реже – максимизирующему) время движения (или, что то же самое, минимизирующему оптическую длину пути). В более точной формулировке: свет выбирает один путь из множества близлежащих, требующих почти одинакового времени для прохождения; другими словами, любое малое изменение этого пути не приводит в первом порядке к изменению времени прохождения.

Этот принцип, сформулированный в I в. Героном Александрийским для отражения света, в общем виде был сформулирован Пьером Ферма в 1662 году в качестве самого общего закона геометрической оптики. В различных частных случаях из него следовали уже

известные законы: прямолинейность луча света в однородной среде, законы отражения и преломления света на границе двух сред.

Принцип Ферма представляет собой предельный случай принципа Гюйгенса-Френеля в волновой оптике для случая исчезающе малой длины волны света.

**Закон обратимости светового луча.** Согласно ему, луч света, распространившийся по определённой траектории в одном направлении, повторит свой ход в точности при распространении и в обратном направлении.

**Принцип Гюйгенса-Френеля** – основной постулат волновой теории, описывающий и объясняющий механизм распространения волн, в частности, световых. Принцип Гюйгенса-Френеля является развитием принципа, который ввёл Христиан Гюйгенс в 1678 году: каждая точка поверхности, достигнутая световой волной, является вторичным источником вторичных волн.

Огибающая вторичных волн становится фронтом волны в следующий момент времени (рис. 3).



Рис. 3. Интерференция световых волн

Принцип Гюйгенса объясняет распространение волн, согласующееся с законами геометрической оптики, но не может объяснить явления дифракции. Огюстен Жан Френель в 1815 г. дополнил принцип Гюйгенса, введя представления о когерентности и интерференции элементарных волн, что позволило рассматривать на основе принципа Гюйгенса-Френеля и дифракционные явления.

Принцип Гюйгенса-Френеля формулируется следующим образом:

**Каждый элемент волнового фронта можно рассматривать, как центр вторичного возмущения, порождающего вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией этих волн.**

С помощью принципа Гюйгенса можно вывести закон отражения света.

Рассмотрим отражение плоской волны (рис. 4). Волна называется *плоской*, если поверхности равной фазы (*волновые поверхности*) представляют собой плоскости.

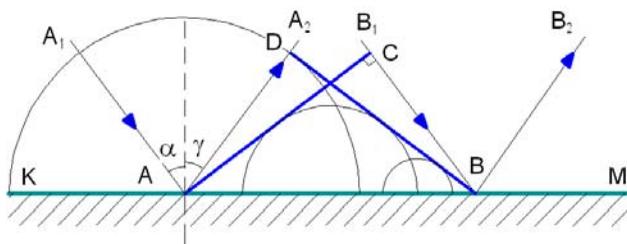


Рис. 4. Отражение пучка параллельных лучей

На рисунке:  $KM$  – отражающая поверхность, прямые  $A_1A$  и  $B_1B$  – два луча падающей плоской волны (они параллельны друг другу). Плоскость  $AC$  – волновая поверхность этой волны.

Угол  $\alpha$  между падающим лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения называют *углом падения*.

Волновую поверхность отраженной волны можно получить, если провести огибающую вторичных волн, центры которых лежат на границе раздела сред. Различные участки волновой поверхности  $AC$  достигают отражающей границы неодновременно. Возбуждение колебаний в точке  $A$  начнется раньше, чем в точке  $B$ , на время  $\Delta t = CB/v$  ( $v$  – фазовая скорость волны).

В момент, когда волна достигнет точки  $B$  и в этой точке начнется возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке  $A$  уже будет представлять собой полусферу радиусом  $r = AD = v \Delta t = CB$ . Радиусы вторичных волн от источников, расположенных между точками  $A$  и  $B$ , меняются так, как показано на рисунке. Огибающей вторичных волн является плоскость  $DB$ , касательная к сферическим по-

верхностям. Она представляет собой волновую поверхность отраженной волны. Отраженные лучи  $AA_2$  и  $BB_2$  перпендикулярны волновой поверхности  $DB$ . Угол  $\gamma$  между перпендикуляром к отражающей поверхности и отраженным лучом называют *углом отражения*.

Так как  $AD = CB$  и треугольники  $ADB$  и  $ACB$  – прямоугольные, то  $\angle DBA = \angle CAB$ . Но  $\alpha = \angle CAB$  и  $\gamma = \angle DBA$  как углы с перпендикулярными сторонами. Следовательно, *угол отражения равен углу падения*:  $\alpha = \gamma$ .

Кроме того, как вытекает из построения Гюйгенса, **падающий луч, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости**. Эти два утверждения представляют собой *закон отражения света*.

Выведем закон преломления света с помощью принципа Гюйгенса.

Преломление света при переходе из одной среды в другую вызвано различием в фазовых скоростях распространения света в той и другой среде. Обозначим фазовую скорость волны в первой среде через  $v_1$ , а во второй – через  $v_2$ .

Пусть на плоскую границу раздела двух сред (например, из воздуха в воду) падает плоская световая волна (рис. 5).

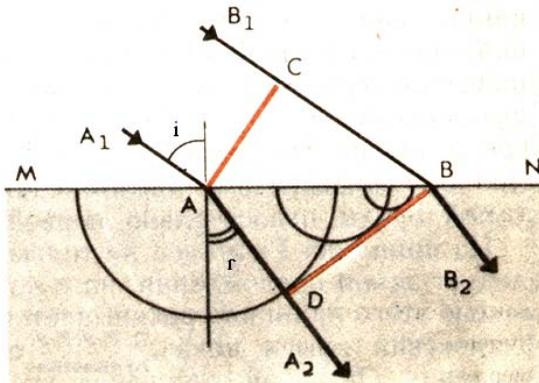


Рис. 5. Преломление пучка параллельных лучей

Волновая поверхность  $AC$  перпендикулярна лучам  $A_1A$  и  $B_1B$ . Поверхности  $MN$  сначала достигает луч  $A_1A$ . Луч  $B_1B$  достигнет поверхности спустя время

$$\Delta t = CB / v_1.$$

Поэтому в момент, когда вторичная волна в точке  $B$  только начнет возбуждаться, волна от точки  $A$  уже имеет вид полусферы радиусом  $AD = v_2 \Delta t$ .

Волновую поверхность преломленной волны можно получить, проведя поверхность, касательную ко всем вторичным волнам во второй среде, центры которых лежат на границе раздела сред. В данном случае это плоскость  $BD$ . Она является огибающей вторичных волн.

Угол падения  $i$  луча равен углу  $CAB$  в треугольнике  $ABC$  (стороны одного из этих углов перпендикулярны сторонам другого). Следовательно:

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin i. \quad (1)$$

Угол преломления  $r$  равен углу  $ABD$  треугольника  $ABD$ . Поэтому

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin r. \quad (2)$$

Разделив почленно формулы (1) на (2), получим

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21},$$

где  $n_{21}$  – постоянная величина, не зависящая от угла падения, называемая относительным показателем преломления второй среды относительно первой.

В частном случае, если первая среда – вакуум, то  $v_1 = c$ . Тогда показатель преломления среды относительно вакуума  $n = \frac{c}{v}$  называется ее абсолютным показателем преломления. Он показывает, во сколько раз фазовая скорость света в вакууме больше, чем в данной среде. Так как скорость света в вакууме – максимальная скорость передачи взаимодействия, то  $n \geq 1$ .

Из построения видно, что **падающий луч, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в од-**

**ной плоскости.** Данное утверждение совместно с уравнением, согласно которому **отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред**, представляет собой **закон преломления света**.

Убедиться в справедливости закона преломления можно экспериментально, измеряя углы падения и преломления и вычисляя отношение их синусов при различных углах падения. Это отношение остается неизменным.

### **Явление полного внутреннего отражения. Предельные углы падения и преломления**

Световые лучи, переходя из среды с большим показателем преломления (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем преломления (оптически менее плотную), удаляются от перпендикуляра, восстановленного в точке падения луча к границе раздела сред.

Как бы ни изменялся при этом угол падения  $i$ , угол преломления  $r$  в этом случае всегда остается большим угла падения ( $r > i$ ). При некотором угле падения  $i = i_0$  угол преломления достигает наибольшего значения, т.е.  $90^\circ$ . Преломленный луч при этом скользит вдоль поверхности, разделяющей среды (рис. 6).

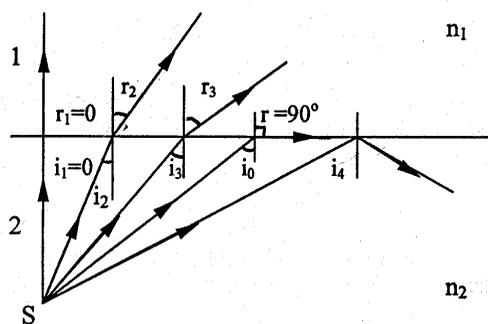


Рис. 6. Полное внутреннее отражение

Угол падения  $i_0$ , которому соответствует угол преломления  $r = 90^\circ$ , называется **предельным углом падения**.

Все лучи, падающие из среды оптически более плотной под углом, большим предельного угла падения ( $i > i_0$ ), в среду оптически менее плотную, не войдут, т.е. будут полностью отражены. Это явление называется **полным внутренним отражением**.

Если же световые лучи переходят из среды с меньшим показателем преломления в среду с большим показателем преломления, то угол преломления всегда меньше угла падения ( $r < i$ ).

Угол преломления  $r_0$ , соответствующий углу падения  $i = 90^\circ$ , называется **предельным углом преломления** (рис. 7).

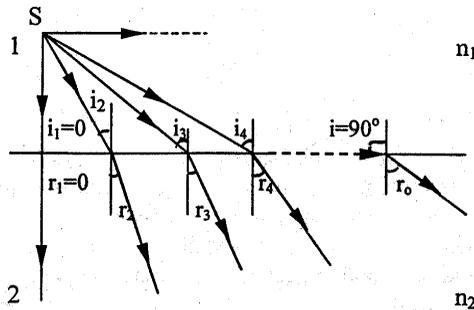


Рис. 7. Зависимость угла преломления от угла падения

Значения предельных углов падения и преломления зависят от относительного показателя преломления граничащих сред. Если луч падает под предельным углом падения, то закон преломления, записанный для этого случая, примет вид

$$\frac{\sin i_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_1}{n_2}, \text{ откуда } \sin i_0 = \frac{n_1}{n_2}. \quad (3)$$

Для луча, угол падения которого  $i = 90^\circ$ , закон преломления будет иметь вид

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin r_0} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ откуда } \sin r_0 = \frac{n_1}{n_2}. \quad (4)$$

Сравнивая (3) и (4), имеем:

$$\sin i_0 = \sin r_0.$$

Это означает, что для данных двух сред предельные углы падения и преломления равны. Поэтому говорят просто о предельном угле для двух граничащих сред, величина которого будет тем больше, т.е. угол тем ближе к  $90^\circ$ , чем меньше различаются показатели преломления сред, т.е. чем ближе отношение  $\frac{n_1}{n_2}$  к единице. Если одна из граничащих сред – вакуум или воздух, тогда  $\sin i_0 = \sin r_0 = \frac{1}{n}$ , где  $n$  – абсолютный показатель преломления второй среды. Зависимость предельного угла от относительного показателя преломления двух сред использована при устройстве рефрактометра.

Рассмотренное нами явление полного внутреннего отражения применяется в световодах.

**Световоды** (волновод оптический) – закрытые устройства для направленной передачи света. Они позволяют значительно уменьшить потери световой энергии при ее передаче на большие расстояния.

Наиболее перспективный и широко применяемый в настоящее время – гибкий диэлектрический волновой световод. В простейшем варианте он представляет собой длинную гибкую нить из оптически

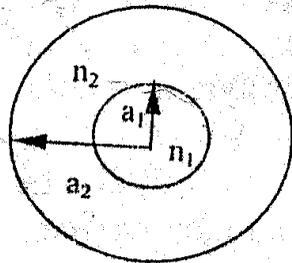


Рис. 8. Устройство световода

прозрачного материала, сердцевина которой радиуса  $a_1$  имеет показатель преломления  $n_1$ , а оболочка с радиусом  $a_2$  – показатель преломления  $n_2 < n_1$  (рис. 8). Поэтому лучи, распространяющиеся под достаточно малыми углами к оси световода, испытывают полное внутреннее отражение на поверхности раздела сердцевина-оболочка и распространяются только по сердцевине.

Материал для изготовления волоконных световодов должен обладать способностью вытягиваться в тонкую нить, быть прозрачным и иметь разные показатели преломления сердцевины и оболочки. Эти требования пока в основном ограничивают круг материалов пластмассами и стеклами (они должны иметь высокую степень химической чистоты для очень низких оптических потерь).

Важнейшей характеристикой световодов являются оптические потери, обусловленные поглощением и рассеянием света. В волоконных световодах на основе кварцевого стекла они  $\sim 1$  дБ/км.

Волоконные световоды находят широкое применение в медицине (например, эндоскопия), в вычислительной технике, системах оптической связи и т.д.

В 1990 г. в мире произведено свыше 5 млн километров волоконных световодов для волоконно-оптических систем. В 1988 г. проложена первая подводная волоконно-оптическая система связи между Америкой и Европой, а в 1989 г. – транстихоокеанская волоконно-оптическая система Америка – Гавайские острова – Япония.

### Рефрактометр. Ход лучей в рефрактометре

Рефрактометр, применяемый в данной работе, предназначен для определения показателя преломления жидкости (рис. 9).

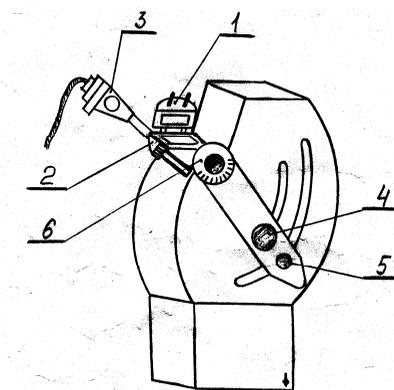


Рис. 9. Схема установки:

- 1 – осветительная призма; 2 – измерительная призма; 3 – осветитель; 4 – окуляр;  
5 – ручка; 6 – ручка дисперсионного компенсатора

Тонкий слой исследуемого прозрачного раствора помещается между двумя слоями стекла – призмами, показатель преломления которых ( $n_1 = 1,9$ ) больше, чем у раствора (рис. 10).

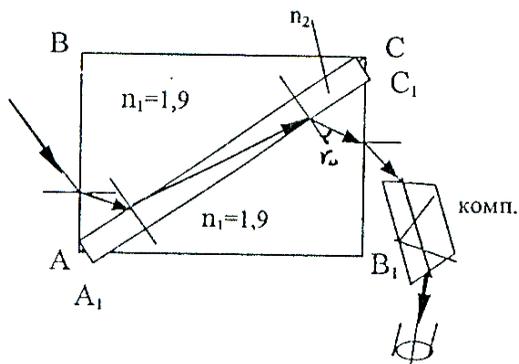


Рис. 10. Принцип работы рефрактометра

От источника света лучи направляются в призму ABC (в приборе – верхняя призма). Матовой гипотенузной поверхностью AC этой призмы свет рассеивается, поэтому призму ABC называют осветительной. Затем рассеянные световые лучи, пройдя через слой исследуемой жидкости, падают на гипотенузную поверхность  $A_1C_1$  призмы  $A_1B_1C_1$ . При этом углы падения лучей на поверхность  $A_1C_1$  могут принимать значения от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , а углы преломления при переходе в призму  $A_1B_1C_1$  – от  $0^\circ$  до  $r_0$ , где  $r_0$  – предельный угол преломления сред раствор-стекло, границей раздела которых служит поверхность  $A_1C_1$ . Наибольший угол преломления  $r_0$  при этом будут иметь те лучи, угол падения которых на поверхность  $A_1C_1$  будет равен  $90^\circ$ .

Пройдя сквозь анализаторную призму и преломившись на ее поверхности  $B_1C_1$ , световые лучи проходят затем через компенсаторную призму (комп.), зрительную трубу и попадают в глаз наблюдателя.

Направления лучей в световом потоке, выходящем из анализаторной призмы  $A_1B_1C_1$ , оказываются ограниченными. Так как не может быть лучей, углы преломления которых на этой поверхности были бы больше предельного (то есть  $r_0$ ), то при фокусировании

часть поля зрения зрительной трубы, соответствующая этим лучам, окажется затемненной. При этом границу светотени образуют лучи, угол падения которых на поверхность  $A_1C_1$  был равен  $90^\circ$  и угол преломления –  $r_0$ .

Если изменить концентрацию раствора, то значение предельного угла тоже изменится вследствие изменения относительного показателя преломления системы раствор-стекло. Это приведет к соответствующему смещению границы светотени в поле зрения трубы. Наблюдая за смещением границы светотени, можно судить об изменении показателя преломления раствора, а следовательно, также и о концентрации раствора.

### Вопросы к зачету

1. Что изучает геометрическая оптика? Каковы границы применимости ее законов?
2. Сформулируйте законы геометрической оптики.
3. Сформулируйте принцип Гюйгенса и принцип Гюйгенса-Френеля.
4. Докажите закон отражения света.
5. Докажите закон преломления света.
6. Абсолютный и относительный показатели преломления.
7. Полное внутреннее отражение. Предельные углы падения и преломления.
8. Применение явления полного внутреннего отражения. Световоды.
9. Построить ход лучей в рефрактометре.
10. Объяснить, почему положение границы светотени в рефрактометре зависит от концентрации раствора.

## Литература

1. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М. : Гостехтеориздат, 1957. – § 127, 147.
2. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1990. – § 165.
3. Фриш, С. Э. Курс общей физики / С. Э. Фриш, А. В.Тиморева. – М. : Гостехтеориздат, 1963. – Т.3, § 251, 155, 275.

Учебное издание

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА СОЛИ ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОМЕТРА**

Методические указания к лабораторной работе по физике  
для студентов строительных специальностей

Составители:

**ИВАНОВ** Алексей Алексеевич  
**ПОТАЧИЦ** Владимир Александрович  
**КЛИМОВИЧ** Ирина Антоновна и др.

Редактор *Л. Н. Шалаева*  
Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 03.01.2014. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,05. Уч.-изд. л. 0,82. Тираж 100. Заказ 1006.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.