

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кафедра физики
с курсом высшей математики

Л.А. Колубаева, А.И. Башкиров

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ РЕФРАКТОМЕТРОМ

Методическое пособие к лабораторной работе
для студентов врачебных факультетов

Томск
Издательство СибГМУ
2017

УДК 535.324(075.8)
ББК 22.343.2я73
К 617

Авторы:

Л.А. Колубаева, А.И. Башкиров

К 617 Колубаева Л.А. Определение показателя преломления жидкости рефрактометром: методическое пособие к лабораторной работе / Л. А. Колубаева, А. И. Башкиров. – Томск: Издательство СибГМУ, 2017. – 13 с.

В методическом пособии описаны эффекты, возникающие при прохождении света через границу раздела двух сред, принцип действия приборов, использующих эти эффекты – рефрактометров. Описана методика измерения показателя преломления растворов, а также методика определения концентрации водных растворов.

Методическое пособие предназначено для студентов врачебных факультетов.

УДК 535.324(075.8)
ББК 22.343.2я73

© Л.А. Колубаева, А.И. Башкиров, 2017
© Издательство СибГМУ, 2017

Лабораторная работа
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
ЖИДКОСТИ РЕФРАКТОМЕТРОМ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение принципа работы рефрактометра и исследование зависимости показателя преломления раствора от концентрации.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: рефрактометр РПЛ-3, пипетка, растворы соли или сахара различной концентрации.

ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ
ПРИМЕНЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ

Длины воспринимаемых глазом световых волн λ очень малы (порядка 10^{-7} м). Поэтому, отвлекаясь от волновой природы света, его распространение можно в первом приближении рассматривать вдоль некоторых линий, называемых лучами. В предельном случае, соответствующем $\lambda \rightarrow 0$, законы можно сформулировать на языке геометрии. В соответствии с этим раздел оптики, в котором пренебрегают конечностью длин волн, называется **геометрической оптикой**.

Основу геометрической оптики образуют четыре закона: 1) закон прямолинейного распространения света; 2) закон независимости световых лучей; 3) закон отражения света; 4) закон преломления света.

Закон прямолинейного распространения света утверждает, что в однородной среде свет распространяется прямолинейно.

Закон независимости световых лучей утверждает, что лучи при пересечении не взаимодействуют друг с другом. Пересечение лучей не мешает каждому из них распространяться независимо друг от друга.

Закон отражения света утверждает, что отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром восстановленным в точку падения А; угол отражения β равен углу падения α (рис. 1).

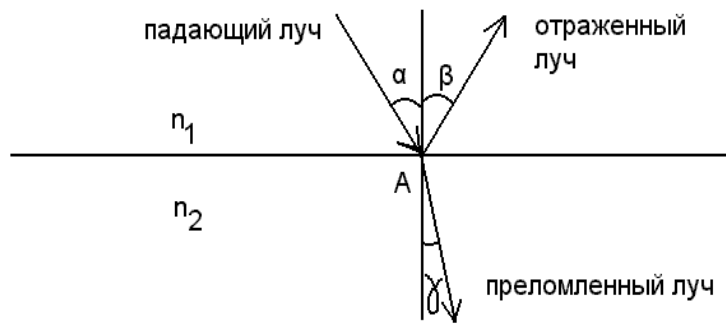


Рис. 1. Отражение и преломление света при падении на границу раздела двух сред

Закон преломления света формулируется следующим образом: преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точку падения А; отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления γ есть величина постоянная для данных сред

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{12} \quad (1)$$

Величина n_{12} называется относительным показателем преломления второй среды относительно первой

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2)$$

где, n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления среды 1 и 2 соответственно.

Абсолютный показатель преломления показывает во сколько раз скорость распространения света в среде v меньше скорости распространения света в вакууме c

$$n = \frac{c}{v}.$$

Заменив в формуле (1) n_{12} выражением (2), закон преломления можно представить в виде

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma. \quad (3)$$

Из этой формулы видно, что при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную ($n_1 > n_2$) луч света удаляется от нормали к поверхности раздела двух сред, т.е. угол γ больше угла α . Увеличение угла падения α сопровождается более быстрым ростом угла преломления γ и, при достижении углом α значения

$$\alpha_{\text{пред}} = \arcsin n_{12}, \quad (4)$$

угол γ становится равным $\pi/2$. Угол, определяемый формулой (4), называется предельным углом падения. А явление называется полным внутренним отражением.

Энергия, которую несет падающий луч, распределяется между отраженным и преломленным лучами. По мере увеличения угла падения интенсивность отраженного луча растет, интенсивность же преломленного луча убывает, обращаясь в ноль при предельном угле падения. При угле падения большем, чем предельный угол, энергия падающего луча полностью передается отраженному лучу.

ЯВЛЕНИЕ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

При падении света на границу раздела двух сред, скорость распространения света в которых различна, происходит изменение его направления. Это явление называется преломлением или рефракцией света. Абсолютным показателем преломления среды называют отношение скорости распространения света в вакууме (обозначается c) к скорости его распространения в данной среде v :

$$n = c/v.$$

При переходе света из среды с меньшим показателем преломления (оптически менее плотная среда) в среду с большим показателем преломления (оптически более плотная среда) угол падения луча больше угла преломления (рис. 2, а). Если луч падает на границу раздела сред под наибольшим возможным углом $i = \pi/2$ (луч скользит вдоль границы раздела сред), то он будет преломляться под углом $r_{\text{пр}} < \pi/2$. Этот угол является наибольшим углом преломления для данных сред и называется предельным углом преломления. Из закона преломления света следует

$$n_{12} = \sin(\pi/2)/\sin(r_{\text{пр}}) = 1/\sin(r_{\text{пр}}) = n_2/n_1, \quad (5)$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления сред, откуда $\sin(r_{\text{пр}}) = n_1/n_2$.

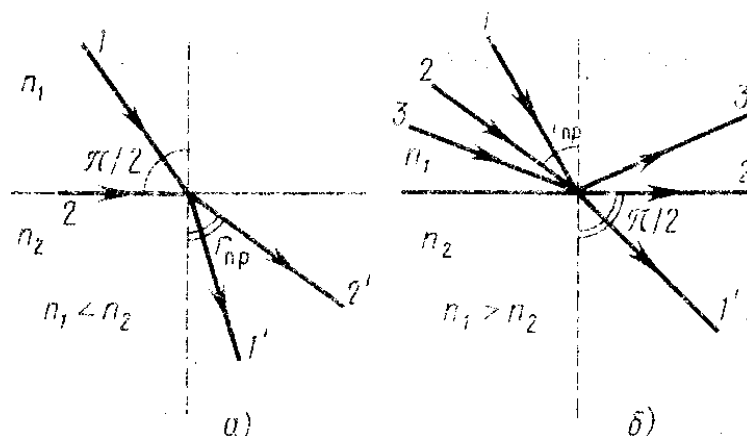


Рис. 2. Падение света на границу раздела двух сред из оптически менее плотной среды (а), из оптически более плотной среды (б)

Если свет переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, то угол преломления больше угла падения. При некотором угле падения i луча угол преломления равен $\pi/2$, т. е. преломленный луч скользит вдоль границы раздела сред (рис. 2, б).

При дальнейшем увеличении угла падения преломление не происходит, весь падающий свет отражается от границы раздела сред. Угол i называется предельным углом полного внутреннего отражения и обозначается $i_{пр}$. Так как $n_{12} = \sin(i_{пр})/\sin(\pi/2) = n_2/n_1$,
то
 $\sin(i_{пр}) = n_2/n_1$.

(6)

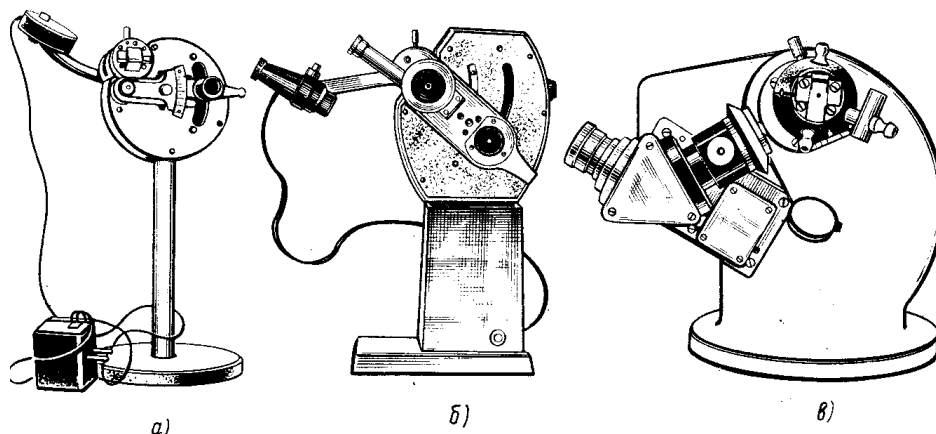


Рис. 3. Различные типы рефрактометров

Таким образом, предельный угол преломления и предельный угол полного внутреннего отражения для данных сред зависят от их показателей преломления. Это нашло применение в приборах для измерения показателя

преломления веществ — рефрактометрах (рис. 3, а–в), используемых при определении чистоты воды, концентрации общего белка сыворотки крови, для идентификации различных веществ и т. д.

Явление полного внутреннего отражения лежит в основе волоконной оптики. Свет, попадая внутрь прозрачного волокна, окруженного веществом с меньшим показателем преломления, многократно отражается и распространяется вдоль этого волокна. Диаметр этих тонких стеклянных или пластиковых волокон может быть доведен до нескольких микрометров. Для передачи больших световых потоков и сохранения гибкости светопроводящей системы отдельные волокна собираются в пучки (жгуты) – световоды, свет по световоду может передаваться почти без потерь.

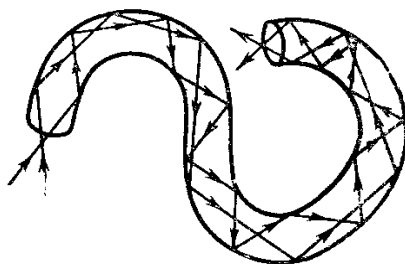


Рис. 4. Распространение света в оптическом волокне

Рисунок 4 демонстрирует, как распространяется свет по тонкому волокну, испытывая только скользящие отражения от стенок, т.е. претерпевая полное внутреннее отражение. Если световоду придать сложную форму, то угол падения обычно превышает предельный, и свет будет передан от одного торца световода до другого практически без ослабления. Этот эффект используется в декоративных светильниках и при подсветке струй в фонтане. Световоды можно использовать для освещения труднодоступных мест, например внутренних органов человека. Одно из остроумных применений волоконной оптики, в частности, в медицине – это передача четких изображений. Вводя через пищевод больного световод, врач получает возможность визуально обследовать стенки желудка. По одним волокнам посылается свет для освещения желудка, а по другим идет отраженный свет. На противоположном торце световода наблюдатель видит серию светлых и темных пятен (как на телевизионном экране), т.е. картину у противоположного торца световода. Волокна должны быть оптически изолированы друг от друга. Обычно на них наносится вещество с меньшим показателем преломления. Волокна должны быть строго параллельны, иначе изображение не получится четким. Чем больше волокон в световоде, и чем они тоньше, тем лучше разрешаются детали изображения.

Таким образом, в медицине световоды используются для решения двух задач: 1) передачи световой энергии, главным образом для освещения холодным светом внутренних полостей; 2) передачи изображения. Используя волоконную оптику, удалось, во-первых, свет от лампочки передать внутрь органа по световоду, тем самым избегая нежелательного нагревания этого органа, во-вторых, гибкость волоконно-оптических систем допускает осмотр большей части полостей, например, при обследовании желудка или других труднодоступных мест при подготовке больного к операции, выполнение самой операции или поиск травм и повреждений без хирургического вмешательства.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Определение показателя преломления можно проводить различными способами: по измерению углов падения и преломления, по измерению наименьшего угла отклонения призмы и ее преломляющего угла, интерференционными методами (по смещению интерференционных полос), по смещению изображения предмета, рассматриваемого через плоскопараллельную пластинку с помощью микроскопа, иммерсионными методами и методами, основанными на полном отражении.

В работе применяется рефрактометр, в котором используется полное внутреннее отражение (рефрактометр Аббе). В рефрактометрах этого типа исследуемая среда (обычно жидкость) помещается в зазоре (около 0,1 мм) между гранями двух стеклянных прямоугольных призм (рис. 5).

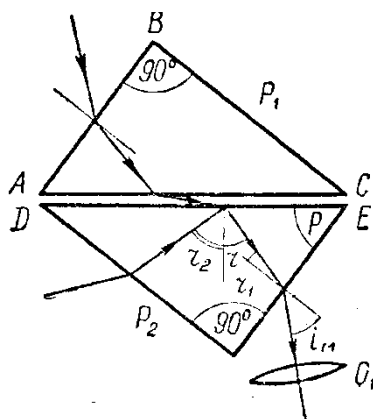


Рис. 5. Ход лучей в стеклянных призмах рефрактометра Аббе

При измерениях используются два метода: 1) метод скользящего луча и 2) метод полного внутреннего отражения. При методе скользящего луча свет направляется через грань АВ призмы P₁, который проходит через матовую поверхность АС и далее через слой жидкости проникает в призму P₂. Для

лучей, которые скользят вдоль грани DE, можно записать закон преломления в виде:

$$n = n_1 \sin(r) \quad (7)$$

Угол r равен предельному углу преломления для границы стекло - исследуемое вещество; n - показатель преломления исследуемой среды в зазоре; n_1 - показатель преломления стекла призмы, $n_1 > n$. Для грани EF закон преломления записывается в виде

$$n_1 \sin(r_1) = \sin(i_m). \quad (8)$$

Преломляющий угол призмы DEF:

$$P = r + r_1. \quad (9)$$

Тогда, учитывая (7-9), найдем:

$$n = \sin P \sqrt{n_1^2 - \sin^2(i_m)} - \cos P \sin(i_m). \quad (10)$$

Угол выхода лучей i_m будет иметь наименьшее значение для скользящих лучей. Лучи, проходящие через грань EF, будут выходить под углами от 90° до i_m , определяемого соотношением (10). Если на пути этих лучей поставить собирающую линзу O_1 , то в ее фокальной плоскости получается изображение, на котором будет видна резкая граница между светом и тенью. Граница раздела соответствует направлению выхода лучей под наименьшим углом (т. е. под углом i_m). Положение ее будет зависеть от величины показателя преломления среды (при данных призмах). Граница рассматривается через вторую линзу, которая совместно с O_1 образует зрительную трубу, установленную на бесконечность. С помощью такой трубы определяется угол i_m и по известным значениям P и n_1 рассчитывается показатель преломления.

При методе полного внутреннего отражения свет вводится в рефрактометр через матовую грань DF призмы P_2 . Свет падает на грань DE под всевозможными углами. При углах падения $r_2 > r$ будет полное внутреннее отражение. Лучи, проходящие через грань EF и имеющие углы выхода больше i_m , будут в фокальной плоскости давать изображение с меньшей освещенностью; лучи с углами выхода меньше i_m (что соответствует условию $r_2 > r$) будут давать большую освещенность. В поле зрения трубы в этом случае будет наблюдаться резкая граница раздела между полутенью и светом. Если при использовании первого способа верхняя часть поля зрения будет темной, то во втором способе эта часть поля будет иметь большую освещенность. Положение границы раздела в обоих случаях определяется условием (10). Вторым способом можно измерять показатель преломления и непрозрачных тел.

При освещении призм белым светом граница раздела будет размыта и окрашена в различные цвета. Чтобы получить резкое изображение, перед

объективом зрительной трубы помещаются две призмы прямого зрения (призмы Амичи); каждая призма состоит из трех склеенных призм с различными показателями преломления и различной дисперсией (например, крайние призмы изготовлены из кронгласа, средняя – из флинтгласа). Призмы рассчитаны так, чтобы монохроматический луч с длиной волны 589,3 нм не испытывал отклонения. Такое устройство называется компенсатором.

При положении призм компенсатора, указанном на рисунке 5, их дисперсия равна нулю; при повороте одной из призм на 180° дисперсия будет равна удвоенному значению дисперсии одной призмы (при равных дисперсиях призм). В зависимости от взаимной ориентации призм дисперсию можно изменять от нуля до максимального значения. Поворотом призм компенсатора с помощью специального устройства добиваются резкого изображения границы, положение которой соответствует значению показателя преломления для желтой линии натрия (589,3 нм). В простых конструкциях рефрактометров в качестве компенсатора используется одна призма прямого зрения.

Схематически ход лучей в рефрактометре Аббе представлен на рисунке 6, где указано: 1 – осветительное зеркало; 2 – откидная призма; 3 – основная призма; 4 – матовая грань; 5 – исследуемое вещество; 6 – призма компенсатора; 7 – объектив трубы; 8 – оборотная призма; 9 – окуляр с отсчетной шкалой, расположенной в фокальной плоскости окуляра. Общий вид рефрактометра типа РПЛ-3 показан на рисунке 7. Обозначения те же, что на рисунке 6.

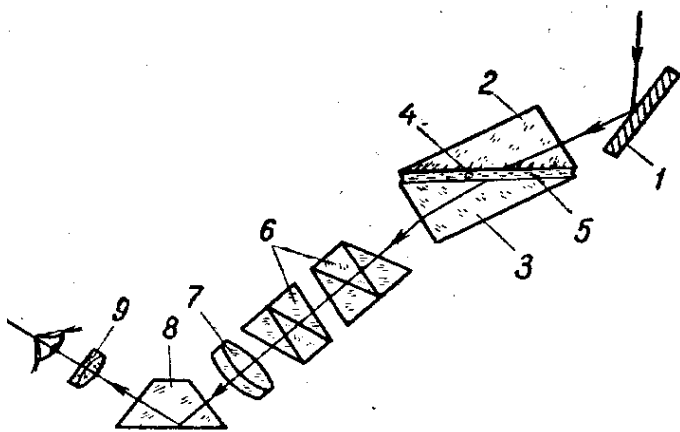


Рис. 6. Оптическая схема рефрактометра Аббе

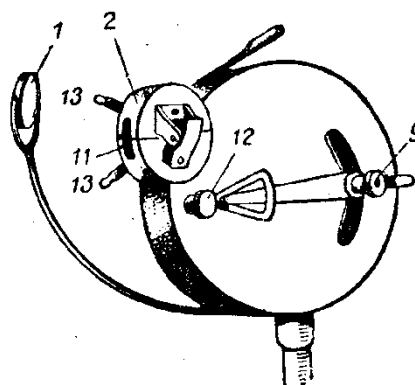


Рис. 7. Общий вид рефрактометра типа РПЛ-3

Для удобства измерений шкала проградуирована непосредственно в значениях показателя преломления. В указанной конструкции рефрактометра имеется два окна, что позволяет вести измерения обоими способами. Одно из окон при измерениях закрывается шторкой 11; для установки компенсатора служит барабан 12. В оправе призм сделана камера, через которую может

прокачиваться жидкость для поддержания постоянной температуры. Подача охлаждающей жидкости осуществляется через штуцеры 13. Перед началом работы необходимо проверить установку прибора. Для этой цели между призмами 2 и 3 помещается капля дистиллированной воды. Смещая окуляр в тубусе трубы, добиваются четкого изображения шкалы и визирной линии. Поворотом компенсатора добиваются четкого изображения границы. Далее, зрительную трубу перемещают до совпадения визирной линии с границей раздела. При правильной установке показание прибора должно быть равно 1,333 (при 20° С).

При измерении показателя преломления твердых тел исследуемый образец должен иметь полированную плоскость. Этой плоскостью он прижимается к призме P2 (откидная призма отводится при этом в сторону). Для обеспечения оптического контакта между соприкасающимися поверхностями вводится тонкий слой жидкости, показатель преломления которой $n_{ж} < n_{тт}$ ($n_{тт}$ — показатель преломления твердого тела).

Практическая часть

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Подготовка прибора к работе:

1. Откиньте верхнюю призму рефрактометра и пипеткой нанесите на нижнюю призму 2–3 капли дистиллированной воды. Опустите верхнюю призму.
2. Фокусируя окуляр, получите резкие изображения поля зрения, визира и шкалы.
3. Перемещая зрительную трубу, получите в поле зрения границу свет–тень. Линия раздела должна быть резкой и без цветной окраски. Последнее достигается поворотом рукоятки компенсатора.
4. Совместите визир с границей раздела свет-тень. При правильной настройке рефрактометра показание шкалы при этом должно соответствовать показателю преломления воды $n = 1,333$ (при 20 °С).

Исследование зависимости показателя преломления раствора NaCl или глюкозы от концентрации:

1. Расположите источник света так, чтобы наблюдения проводились в проходящем свете.
2. Измерьте показатели преломления раствора NaCl различной концентрации C , для этого на нижнюю призму нанеся поочередно растворы различной концентрации и совмещая визир с границей раздела свет-тень, определите по

шкале показатели преломления растворов. Для каждого раствора измерение показателя преломления произведите несколько раз и найдите среднее значение $\langle n \rangle$.

3. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

4. Постройте график зависимости показателя преломления от концентрации $n=f(C)$.

5. Измерьте показатель преломления раствора неизвестной концентрации. Определите по графику концентрацию C_x этого раствора.

Таблица 1

Концентрация раствора					
Показатель преломления					
$\langle n \rangle$					

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
2. Что называется предельным углом преломления?
3. В чем заключается явление полного внутреннего отражения?
4. Что называется предельным углом полного внутреннего отражения?
5. Опишите устройство рефрактометра Аббе.
6. Начертите ход лучей в измерительных призмах при работе методом скользящего луча и методом полного внутреннего отражения.
7. С какой целью применяется рефрактометр в медико-биологических исследованиях?
8. Каким образом проводится измерение показателя преломления жидких и твердых тел?
9. Определите, при каком угле падения луч, отраженный от границы раздела двух сред перпендикулярен преломленному лучу.
10. Найдите показатель преломления среды, если луч, преломленный на границе этой среды с воздухом перпендикулярен отраженному, а синус угла падения равен 0,73.

Учебное издание

Л.А. Колубаева, А.И. Башкиров

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ
ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ
РЕФРАКТОМЕТРОМ**

Методическое пособие к лабораторной работе

для студентов врачебных факультетов

Издательство СибГМУ
634050, г. Томск, пр. Ленина, 107
тел. 8(3822) 51-41-53
E-mail: otd.redaktor@ssmu.ru

ИЗДАНО В ЭЛЕКТРОННОМ ВИДЕ