



## РЕФРАКТОМЕТР АББЕ

### Лабораторная работа № 5.3

МОСКВА 2005

**Цель работы:** Знакомство с методом измерения показателей преломления твёрдых и жидких сред в монохроматическом свете.

**В работе используются:** технический рефрактометр Аббе; осветитель; набор стеклянных образцов; жидкости с неизвестными показателями преломления (глицерин, этиловый спирт); монобромнафталин; дистиллированная вода.

Технический рефрактометр Аббе служит для быстрого (и сравнительно грубого) измерения показателей преломления жидких и твёрдых тел. Устройство рефрактометра Аббе основано на явлении полного внутреннего отражения.

Пусть луч света падает на границу раздела двух сред со стороны оптически более плотной среды ( $n = n_2$ ). Для углов падения  $r$ , меньших предельного  $r_{\text{пр}}$ , свет частично проникает в оптически менее плотную среду ( $n = n_1$ ), а частично отражается. При  $r_{\text{пр}} < r < 90^\circ$  преломлённый луч отсутствует, и наступает полное отражение (рис. 1а). В результате этого в отражённых лучах образуется граница между светлой областью (полное отражение) и полутенью (частичное отражение).

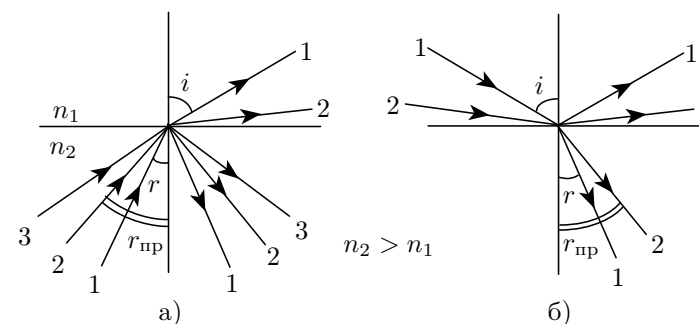


Рис. 1. Предельный угол полного внутреннего отражения (а) и предельный угол преломления (б)

Предельный угол  $r_{\text{пр}}$  соответствует углу преломления  $i = 90^\circ$ ; следовательно,

$$\sin r_{\text{пр}} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (1)$$

Зная показатель преломления одной из сред и определяя на опыте предельный угол, можно с помощью (1) определить показатель преломления второй среды.

Пусть свет падает на границу раздела со стороны оптически менее плотной среды (рис. 1б). В зависимости от угла падения луч во второй

среде может составлять с нормалью углы, расположенные в интервале от нуля до  $r_{\text{пр}}$ . Предельный угол преломления  $r_{\text{пр}}$  соответствует углу падения  $i = 90^\circ$  (скользящий луч). В результате в преломлённых лучах образуется резкая граница между светлой и тёмной областями. Легко видеть, что величина предельного угла и в этом случае определяется формулой (1).

При измерениях показателя преломления с помощью рефрактометра Аббе можно пользоваться как методом полного внутреннего отражения, так и методом скользящего луча.

Оптическая схема рефрактометра Аббе и ход лучей при измерении показателя преломления жидкости по методу скользящего луча показаны на рис. 2.

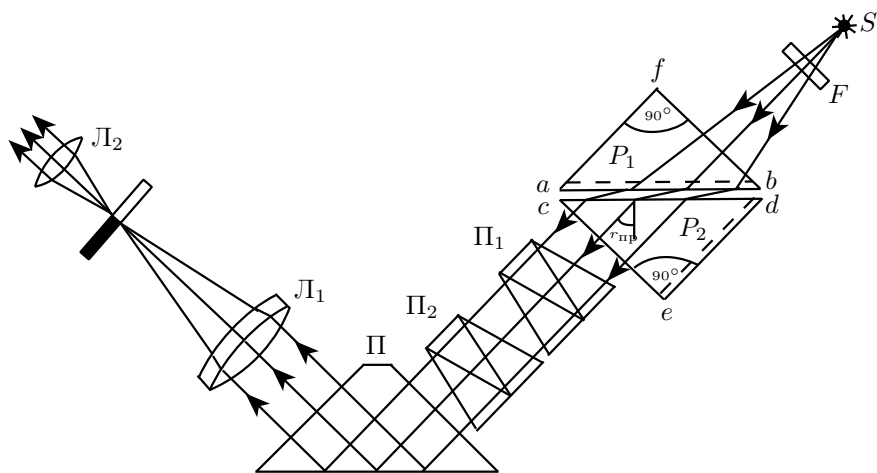


Рис. 2. Ход лучей в рефрактометре при измерении показателя преломления жидкости методом скользящего луча

Основной частью рефрактометра являются две стеклянные прямоугольные призмы  $P_1$  и  $P_2$ , изготовленные из стекла с большим показателем преломления. В разрезе призмы имеют вид прямоугольных треугольников, обращенных друг к другу гипотенузами; зазор между призмами составляет около 0,1 мм и служит для помещения исследуемой жидкости. Свет проникает в призму  $P_1$  через грань  $bf$  и попадает в жидкость через матовую грань  $ab$ . Свет, рассеянный матовой поверхностью, проходит слой жидкости и под всевозможными углами падает на грань  $cd$  призмы  $P_2$ .

Скользящему лучу в жидкости ( $i = 90^\circ$ ) соответствует предельный угол преломления  $r_{\text{пр}}$ . Преломлённые лучи с углами больше  $r_{\text{пр}}$  не возникают. В связи с этим угол выхода лучей из грани  $ce$  может изменяться лишь в некотором интервале.

Если свет, выходящий из грани  $ce$ , пропустить через собирающую линзу  $L_1$ , то в её фокальной плоскости наблюдается резкая граница света и темноты. Граница рассматривается с помощью линзы  $L_2$ . Линзы  $L_1$  и  $L_2$  образуют зрительную трубу, установленную на бесконечность. В их общей фокальной плоскости находится изображение шкалы величин показателя преломления и указателя (нить и перекрестие). В поле зрения окуляра  $L_2$  трубы одновременно можно увидеть только часть изображения шкалы и часть поля сфокусированных лучей, выходящих из призмы  $P_2$ . Вращая систему призм  $P_1$  и  $P_2$  и, следовательно, изменяя наклон предельного пучка лучей относительно оси зрительной трубы, можно добиться, чтобы граница света и тени оказалась в поле зрения окуляра  $L_2$  и совпала с положением указателя. При вращении системы призм поворачивается и шкала показателей преломления, установленная на пластине, жёстко связанной с системой призм  $P_1$  и  $P_2$  (на рис. 2 шкала не показана). Значение показателя преломления жидкости отсчитывается по шкале на уровне резкой границы света и тени.

Если источник света  $S$  не является монохроматическим, то наблюдаемая в окуляре трубы граница света и темноты часто оказывается размытой и окрашенной из-за дисперсии показателя преломления исследуемого вещества (т. е. из-за зависимости  $n$  от длины волны  $\lambda$ ). Для того чтобы получить и в этом случае резкое изображение границы, на пути лучей, выходящих из призмы  $P_2$ , помещают компенсатор с переменной дисперсией. Компенсатор содержит две одинаковые дисперсионные призмы Амичи (призмы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  на рис. 2), каждая из которых состоит из трёх склеенных призм, обладающих различными показателями преломления и различной дисперсией. Призмы рассчитываются так, чтобы монохроматический луч с длиной волны  $\lambda_D = 589,3$  нм (среднее значение длины волны жёлтого дублета натрия) не испытывал отклонения. Лучи с другими длинами волн отклоняются в ту или иную сторону. Если положение призм соответствует рис. 2, то дисперсия двух призм равна удвоенной дисперсии каждой из них. При повороте одной из призм Амичи на  $180^\circ$  относительно другой (вокруг оптической оси) полная дисперсия компенсатора оказывается равной нулю, так как дисперсия одной из призм скомпенсирована дисперсией другой. В зависимости от взаимной ориентации призм дисперсия компенсатора изменяется, таким образом, в пределах от нуля до удвоенного значения дисперсии одной призмы.

Для поворота призм друг относительно друга служат специальная рукоятка и система конических шестерен, с помощью которых призмы одновременно поворачиваются в противоположных направлениях. Вращая ручку компенсатора, следует добиваться того, чтобы граница света и тени в поле зрения стала достаточно резкой. Положение границы при этом соответствует длине волны  $\lambda_D$ , для которой обычно и приводятся значения показателя преломления.

В некоторых случаях, когда дисперсия исследуемого вещества особенно велика, диапазон компенсатора оказывается недостаточным и чёткой границы получить не удаётся. В этом случае рекомендуется устанавливать перед осветителем жёлтый светофильтр.

Применяемая в рефрактометре Аббе поворотная призма  $\Pi$  (призма Дове) позволяет сделать прибор более компактным.

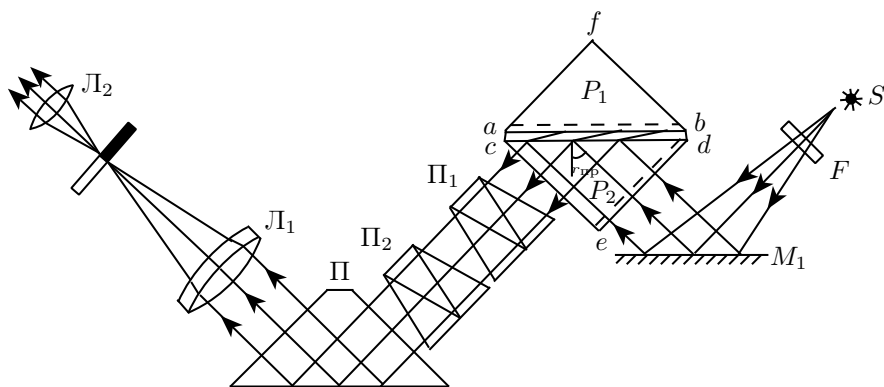


Рис. 3. Ход лучей в рефрактометре при измерении показателя преломления жидкости методом полного внутреннего отражения

На рис. 3 показан ход лучей в рефрактометре при работе по методу полного внутреннего отражения. В этом случае свет от источника  $S$  после отражения от зеркала  $M_1$  падает на матовую грань  $ed$  призмы  $P_2$  (в методе скользящего луча эта поверхность закрывается металлической шторкой). После рассеяния на грани  $ed$  свет падает на границу раздела стекло-жидкость под всевозможными углами. При  $r > r_{\text{пр}}$  наступает полное внутреннее отражение, при  $r < r_{\text{пр}}$  свет отражается частично. В поле зрения трубы наблюдается граница света и полутени.

Так как условия, определяющие величину предельного угла в методе скользящего луча и в методе полного внутреннего отражения, совпадают, положение линии раздела в обоих случаях также оказывается одинаковым.

Заметим, что, в отличие от метода скользящего луча, метод полного внутреннего отражения позволяет измерять показатели преломления непрозрачных веществ.

Рефрактометр Аббе можно использовать и для измерения показателей преломления твёрдых тел. И в этом случае применимы как метод полного внутреннего отражения, так и метод скользящего луча. Исследуемый образец должен иметь плоскую полированную поверхность; этой поверхностью он прижимается к гипотенузе  $cd$  призмы  $P_2$  (призма  $P_1$  при этом отклоняется в сторону). Для обеспечения оптического контакта в зазор между соприкасающимися поверхностями вводится тонкий слой жидкости, показатель преломления  $n$  которой удовлетворяет условию:  $n_1 \leq n \leq n_2$ , где  $n_1$  — показатель преломления исследуемого образца, а  $n_2$  — показатель преломления призмы  $P_2$ . При выполнении этого условия наличие слоя жидкости не искажает результатов измерения. (Студентам предлагается самостоятельно разобраться в этом вопросе.) Обычно для создания оптического контакта используют монобромнафталин, показатель преломления которого для жёлтых линий натрия равен  $n_0 = 1,66$ .

При работе по методу скользящего луча образец должен иметь полированную боковую поверхность, сквозь которую в него проникает свет (рис. 4).

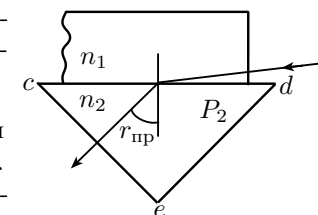


Рис. 4. Измерение показателя преломления твёрдых тел

**Работа с прибором.** На рис. 5 представлен внешний вид рефрактометра Аббе ИРФ-22. Измерение показателя преломления проводят в следующем порядке. Откинув призму  $P_1$ , с помощью пипетки помещают каплю исследуемой жидкости на поверхность призмы  $P_2$ . Возвратив призму  $P_1$  в исходное положение, направляют свет от осветителя на грань  $bf$  верхней призмы  $P_1$  (при измерениях по методу скользящего луча) или с помощью зеркала  $M_1$  — на грань  $ed$  нижней призмы  $P_2$  (при измерениях по методу полного внутреннего отражения). В первом случае шторка  $L$  должна закрывать грань  $ed$  призмы  $P_2$ , а во втором её необходимо отвести в сторону.

С помощью зеркала  $M_2$  направляют свет от окна в лаборатории (или от осветительной лампы) на шкалу показателей преломления, находящуюся за матовым стеклом в корпусе прибора. Яркость освещения шкалы подбирают, наблюдая её изображение через окуляр  $L_2$ . Вращая блок призм  $P_1$  и  $P_2$  с помощью ручки  $H_1$ , приводят границу света и темноты

(или света и полутени) в поле зрения окуляра; вращая ручку  $H_2$  компенсатора, добиваются того, чтобы эта граница была резкой. После этого по шкале определяют величину показателя преломления.

Следует иметь в виду, что рабочие поверхности призм  $P_1$  и  $P_2$  легко повредить, поэтому при работе с ними необходима осторожность. Чтобы получать правильные значения показателей преломления, необходимо перед каждым опытом тщательно очищать рабочие поверхности призм. Приступая к измерениям, необходимо прежде всего убедиться в правильной работе прибора. Такую проверку проще всего выполнить, измерив показатель преломления вещества с известным показателем преломления. Для этого к каждому прибору прилагается эталонная стеклянная пластинка с известным  $n_D$ . В правильности работы прибора можно убедиться и в отсутствие такой пластинки, измеряя, например, показатель преломления дистиллированной воды, для которой (при  $t = 20^\circ\text{C}$ )  $n_D = 1,33291$ . Если измерение даёт другой результат, следует определить поправку к шкале.

Абсолютная погрешность прибора по паспорту  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ . Область измерения в проходящем свете 1,3–1,7, в отражённом свете 1,3–1,57.

При визуальном отсчёте по шкале наблюдатель, вообще говоря, допускает небольшие ошибки, в результате которых измеренные значения для одного и того же вещества в разных опытах не вполне точно совпадают между собой (случайный разброс). Рекомендуется поэтому проводить в каждом случае несколько измерений показателя преломления и определять среднее значение.

**Рефрактометрия.** Показатели преломления жидких и твёрдых тел могут измеряться с большой точностью. При данной температуре и для данной длины волны они являются важнейшими по-

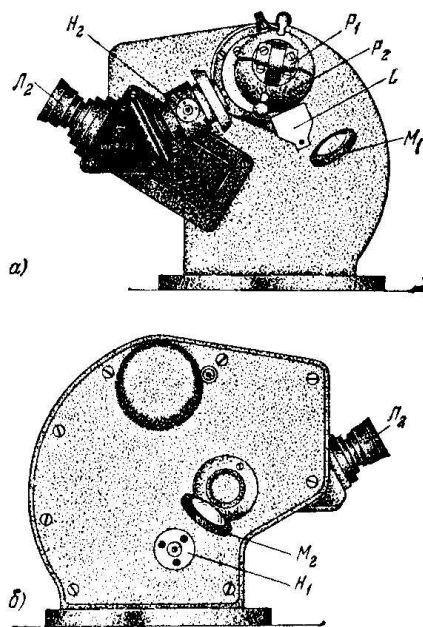


Рис. 5. Рефрактометр Аббе

стоянными, характеризующими вещество. Измерение показателей преломления может быть использовано для исследования веществ, — соответствующий раздел науки носит название рефрактометрии. Обычно измерения проводятся для  $D$ -линии натрия.

В основе рефрактометрического метода исследования лежит так называемая формула Лоренц–Лорентца (см., например, [1]), связывающая показатель преломления  $n$  изотропного вещества с числом молекул  $N$  в единице объёма и поляризуемостью  $\alpha$  молекул вещества:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{1}{3} N \alpha. \quad (2)$$

Формула (2) позволяет находить  $\alpha$  по измерениям показателя преломления вещества  $n$ . Из неё следует, что для данного химического вещества (и для света с заданной длиной волны) выполняется соотношение

$$r = \frac{1}{\rho} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \text{const}, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность вещества, пропорциональная концентрации молекул  $N$ . Величина  $r$  называется удельной рефракцией. Таким образом, из формулы Лоренц–Лорентца (2) следует, что удельная рефракция вещества не должна зависеть от плотности. Хотя вывод формулы Лоренц–Лорентца опирается на ряд не вполне оправданных допущений (см. [1, 3]), формула (3) на опыте обычно хорошо выполняется. Так, для воздуха при изменении давления на несколько сотен атмосфер удельная рефракция изменяется не более чем на 0,1%. Нередко удельная рефракция остаётся практически постоянной даже при изменении агрегатного состояния вещества (например, при замерзании воды).

Опыт показывает также, что удельную рефракцию  $r$  смеси веществ можно вычислить, если известны рефракции  $r_1, r_2, \dots$  её отдельных компонентов и их процентное содержание  $c_1, c_2, \dots$  в смеси:

$$r = \frac{c_1}{100} r_1 + \frac{c_2}{100} r_2 + \dots \quad (4)$$

Это означает, что оптическое поведение молекул каждого компонента практически не зависит от присутствия других компонентов.

Существует эмпирическое правило, согласно которому рефракцию сложного химического соединения можно вычислить, складывая рефракции составляющих его элементов. Для каждого элемента удобно ввести понятие атомной рефракции  $R$ , представляющей произведение

удельной рефракции  $r$  данного элемента на его атомную массу  $A$ :

$$R = Ar = \frac{A n^2 - 1}{\rho n^2 + 1}. \quad (5)$$

Аналогично вводится молекулярная рефракция химического соединения  $R_M$ :

$$R_M = Mr = \frac{M n^2 - 1}{\rho n^2 + 1} = \frac{1}{3} N_A \alpha. \quad (6)$$

Здесь  $M$  — молекулярная масса,  $N_A$  — постоянная Авогадро.

Опыт показывает, что во многих случаях молекулярная рефракция обладает свойством аддитивности:

$$R_M = q_1 A_1 r_1 + q_2 A_2 r_2 + \dots = q_1 R_1 + q_2 R_2 + \dots, \quad (7)$$

где  $q_1, q_2, \dots$  — числа атомов элементов, входящих в состав молекулы. Аддитивность молекулярной рефракции означает, что взаимодействие отдельных атомов с полем световой волны в первом приближении не зависит от других атомов, входящих в состав той же молекулы. Нарушение аддитивности позволяет судить о взаимном влиянии атомов друг на друга и, следовательно, делать заключение о строении молекул.

В нашей работе исследуются рефракции соединений из углерода, водорода и кислорода: воды ( $H_2O$ ), глицерина ( $C_3H_8O_3$ ), этилового спирта ( $C_2H_6O$ ) и метилового спирта ( $CH_4O$ ). Если на опыте измерить показатели преломления трёх из этих соединений (например, воды, глицерина и этилового спирта), то, используя аддитивность молекулярной рефракции, можно вычислить показатель преломления любого другого соединения из углерода, водорода и кислорода (например, метилового спирта). Для этого нужно сначала вычислить по формуле (6) молекулярные рефракции воды, глицерина и этилового спирта (по измеренным значениям показателей преломления), а затем рассчитать атомные рефракции  $R_C$ ,  $R_H$  и  $R_O$ , используя соотношения

$$\begin{aligned} R_{H_2O} &= 2R_H + R_O, \\ R_{C_3H_8O_3} &= 3R_C + 8R_H + 3R_O, \\ R_{C_2H_6O} &= 2R_C + 6R_H + R_O. \end{aligned} \quad (8)$$

По найденным значениям атомных рефракций  $R_C$ ,  $R_H$  и  $R_O$  можно найти молекулярную рефракцию метилового спирта и определить ожидаемую величину его показателя преломления. Аналогичным образом могут быть рассчитаны показатели преломления других соединений из углерода, водорода и кислорода.

## ЗАДАНИЕ

В работе предлагается измерить показатели преломления нескольких стёкол и жидкостей.

1. Перед каждым измерением тщательно протрите рабочую поверхность призмы чистой сухой салфеткой, затем нанесите на поверхность каплю дистиллированной воды и снова протрите призму.
2. Проведите серию контрольных измерений показателя преломления дистиллированной воды (или эталонной стеклянной пластины) и убедитесь в правильной работе прибора. Найдите систематическую ошибку прибора и оцените случайную ошибку, возникающую при измерении (однократном) показателя преломления.
3. Измерьте показатели преломления 2–3-х стеклянных образцов (по указанию преподавателя), используя как метод скользящего луча, так и метод полного внутреннего отражения. Во избежание возникновения царапин на измерительной призме стеклянный образец кладётся на ровный тонкий слой монобромнафталина, покрывающий всю поверхность призмы. Монобромнафталин капают из пипетки на призму прибора и придавливают стеклянным образцом до возникновения ровного по всему полю наблюдения слоя жидкости.
4. Для каждого образца проведите измерения не менее 5-ти раз каждым методом и оцените точность каждого метода. Сравните результат с точностью прибора по паспорту.
5. Аналогичным образом измерьте показатели преломления глицерина и этилового спирта.
6. По экспериментальным значениям показателей преломления вычислите по формуле (6) молекулярные рефракции воды  $R_{H_2O}$  глицерина  $R_{C_3H_8O_3}$  и этилового спирта  $R_{C_2H_6O}$  и поляризуемости  $\alpha$  молекул этих веществ. (Поляризуемость  $\alpha$  определяется формулой  $\alpha = p/\varepsilon_0 E$ , где  $p$  — электрический момент молекулы,  $E$  — напряжённость электрического поля,  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная.)
7. С помощью системы уравнений (8) вычислите атомные рефракции углерода  $R_C$ , водорода  $R_H$  и кислорода  $R_O$ .
8. Предполагая справедливым правило аддитивности, вычислите молекулярную рефракцию метилового спирта  $R_{CH_4O}$  и с помощью формулы (6) найдите его показатель преломления. Сравните вычисленное значение с табличным.
9. Используя вычисленные значения рефракций для воды  $R_{H_2O}$  и углерода  $R_C$ , рассчитайте показатели преломления льда и алмаза. Сравните полученные значения с табличными. (Для алмаза  $n \approx 2,42$ ; для льда

$n = 1,31$ ; Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. — М.: Физматгиз, 1962, с. 91.)

### Контрольные вопросы

1. Что называется полным внутренним отражением?
2. Для чего грани  $ab$  и  $ed$  призм  $P_1$  и  $P_2$  делают матовыми?
3. При каких условиях слой жидкости между исследуемым твёрдым образцом и призмой  $P_2$  не влияет на измеренное значение показателя преломления?
4. Что называется атомной и молекулярной рефракцией? Сформулируйте правило аддитивности для рефракций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландсберг Г.С. Оптика. — М.: Наука, 1976. Гл. XXIV, § 137; гл. XXVIII, § 156.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. IV. Оптика. — М.: Наука, 1980, § 84.
- 3.\* Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970. Гл. II, §§ 2, 3.
- 4.\* Дитчберн Р. Физическая оптика. — М.: Наука, 1965. Гл. 14, 15.