

Лабораторная работа 4.1.3  
Рефрактометр Аббе

Яковлева Саша, группа 625

27 апреля 2018 г.

**Цель работы:** знакомство с методом измерения показателей преломления твердых и жидких сред в монохроматическом свете; определение показателей преломления нескольких стекол и жидкостей.

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

## 1 Понятие рефрактомерии

Основной формулой рефрактометрии является формула Лоренц-Лорентца, связывающая показатель преломления вещества  $n$  с числом его молекул  $N$  в единичном объеме и поляризуемостью  $\alpha$ :

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} N \alpha \quad (1)$$

Свойства вещества характеризует удельная рефракция  $r$ :

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

Здесь  $\rho$  - плотность. При помощи формулы (1) выражение для  $r$  чистого вещества преобразуется следующим образом:  $r = \frac{4\pi}{3} \frac{\alpha}{m_0} = const$ , где  $m_0$  - масса молекулы.

Для химического соединения введено понятие молекулярной рефракции  $R_M = Mr = 4\pi N_A \alpha / 3$ , где  $M$  - молекулярная масса, а для каждого его элемента - понятие атомной рефракции  $R = Ar$ , где  $A$  - атомная масса. Тогда ввиду аддитивности верна формула:

$$R_M = q_1 R_1 + q_2 R_2 + \dots = q_1 A_1 r_1 + q_2 A_2 r_2 + \dots \quad (3)$$

Здесь  $q_i$  - количество атомов  $i$ -ого элемента в составе молекулы.

В работе представленные выше формулы будут использованы для вычисления атомных рефракций элементов, составляющих известные соединения, и последующего определения показателя преломления "новых" образованных этими элементами веществ.

## 2 Принцип работы рефрактометра Аббе

Для измерения показателя преломления среды используется рефрактометр Аббе, действие которого основано на явлении полного внутреннего отражения. Рассмотрим падение света на границу сред (показатели преломления  $n_2 > n_1$ ) со стороны менее оптически плотной среды. Из закона Снеллиуса следует: при увеличении угла падения  $\psi$  растет и угол  $\varphi$ , под которым распространяется свет в плотной среде. При угле падения  $\psi = 90^\circ$  происходит только отражение:

$$\sin \varphi_{\text{пр}} = \frac{n_1}{n_2}$$

Угол  $\varphi_{\text{пр}}$  называется предельным углом преломления; при движении света, наоборот, из более плотной среды  $\varphi_{\text{пр}}$  называют углом полного внутреннего отражения. Рассматриваемое явление иллюстрирует рисунок 1.

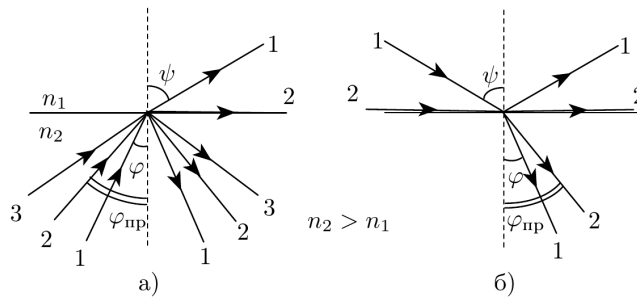


Рис. 1: Преломление света на границе раздела сред с разными показателями преломления

Таким образом, при освещении границы сред в более оптически плотной возникает резкая граница света-тени, на которую и настраивается рефрактометр.

Измерения проводятся по методу скользящего луча (свет падает из менее оптически плотной среды) и по методу полного внутреннего отражения (свет падает из более оптически плотной среды). Ход лучей в рефрактометре показан на рисунке 2 и 3 соответственно.

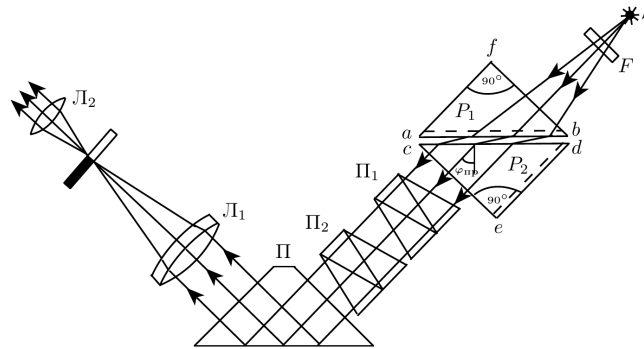


Рис. 2: Ход лучей в рефрактометре Аббе при измерении по методу скользящего луча

Стеклянные прямоугольные призмы  $P_1$  и  $P_2$  имеют большой показатель преломления; узкий зазор между ними служит для помещения исследуемой жидкости (при помощи пипетки) или стеклянной пластинки с неизвестным показателем преломления. В методе скользящего луча свет падает на грань  $bf$ , а в методе полного внутреннего отражения он с помощью зеркала направляется на грань  $cd$ . Свет рассеивается на матовой грани и, пройдя компенсатор, собирается линзой  $L_1$ , имеющей общую фокальную плоскость с линзой окуляра  $L_2$ . Вращением призм  $P_1$  и  $P_2$  добиваются попадания границы света-тени в поле зрения окуляра; значение показателя преломления отсчитывается по шкале на уровне границы.

Рабочие поверхности призм  $P_1$  и  $P_2$  легко повредить, поэтому при измерении показателя преломления стеклянных пластин поверхности покрывают монобромнафталином. Между измерениями пластины тщательно протираются.

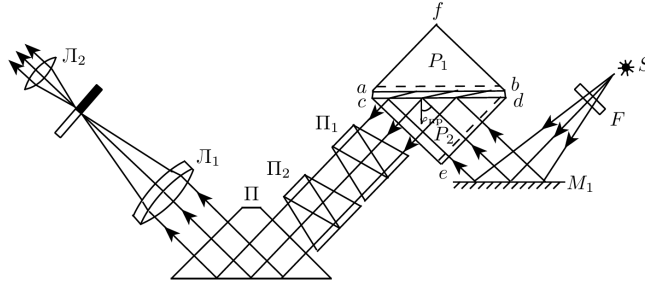


Рис. 3: Ход лучей в рефрактометре Аббе при измерении по методу полного внутреннего отражения

### 3 Измерение показателей преломления стеклянных пластин и некоторых жидкостей

Определим систематическую погрешность прибора и случайную ошибку отдельного измерения. Для этого проведем серию измерений известного показателя преломления дистиллированной воды  $n_D = 1,33291$ ; они занесены в таблицу 1. Данные в первой строчке получены методом скользящего луча, во второй - методом полного внутреннего отражения. Приборная погрешность рефрактометра равна 0,0005.

Метод скользящего луча	1,3310	1,3300	1,3310	1,3305	1,3305	1,3300
Метод полного отражения	1,3290	1,3285	1,3290	1,3290	1,3295	1,3290

Таблица 1: Измерение показателя преломления дистиллированной воды

Для обоих методов максимальная разность двух показаний равна 0,001, следовательно, случайная ошибка  $\sigma_{rand}$  не превосходит приборную, и погрешность, складываемая из случайной и приборной ошибок,  $\sigma \approx 0,0005$ .

Будем писать индекс  $s$ , если величина измерена методом скользящего луча, и индекс  $r$ , если она получена методом полного отражения.

Среднее значение показателя преломления:

$$\langle n \rangle_s = 1,3305; \langle n \rangle_r = 1,3290$$

Средние значения отличаются от истинного  $n_D$ , и систематическая ошибка примерно равна разности истинного и экспериментально определенного значений:

$$\sigma_s = 0,0024; \sigma_r = 0,0039$$

Систематическая ошибка на порядок больше приборной и случайной. В дальнейшем для каждого измерения показателя преломления будем вносить необходимую поправку: прибавлять  $\sigma_s$  или  $\sigma_r$ . Погрешность "исправленного" примем равной  $\sigma$ .

Проведем измерения показателей преломления трех стеклянных образцов, глицерина и этилового спирта, построим таблицы, аналогичные 1:

- стеклянный образец №1

Метод скользящего луча	1,5130	1,5135	1,5135
Метод полного отражения	1,5135	1,5135	1,5135

Таблица 2: Измерение показателя преломления стеклянного образца №1

Измерения приведены в таблице 2.

С учетом поправки на систематический сдвиг, получим следующие показатели преломления:

$$n_s = 1,5157 \pm 0,0005; n_r = 1,5174 \pm 0,0005$$

- стеклянный образец №2

Измерения приведены в таблице 3.

Метод скользящего луча	1,5145	1,5150	1,5150
Метод полного отражения	1,5150	1,5150	1,5150

Таблица 3: Измерение показателя преломления стеклянного образца №2

С учетом поправки на систематический сдвиг, получим следующие показатели преломления:

$$n_s = 1,5172 \pm 0,0005; n_r = 1,5189 \pm 0,0005$$

- стеклянный образец №3

Измерения приведены в таблице 4.

Метод скользящего луча	1,5145	1,5145	1,5150
Метод полного отражения	1,5140	1,5140	1,5140

Таблица 4: Измерение показателя преломления стеклянного образца №3

С учетом поправки на систематический сдвиг, получим следующие показатели преломления:

$$n_s = 1,5171 \pm 0,0005; n_r = 1,5179 \pm 0,0005$$

- глицерин ( $C_3H_8O_3$ )

Измерения приведены в таблице 5.

С учетом поправки на систематический сдвиг, получим следующие показатели преломления:

$$n_s = 1,4699 \pm 0,0005; n_r = 1,4712 \pm 0,0005$$

Метод скользящего луча	1,4675	1,4675	1,4675	1,4675
Метод полного отражения	1,4670	1,4675	1,4670	1,4675

Таблица 5: Измерение показателя преломления глицерина

- этиловый спирт ( $C_2H_6O$ )

Измерения приведены в таблице 6.

Метод скользящего луча	1,3640	1,3620	1,3615	1,3610	1,3600	1,3600	1,3600	1,3600
Метод полного отражения	1,3600	1,3635	1,3605	1,3600	1,3590	1,3600	1,3590	1,3595

Таблица 6: Измерение показателя преломления этилового спирта

Первые четыре значения, измеренные по обоим методам, не учитываем при расчетах, так как показатель преломления уменьшается. Это можно объяснить следующим образом: на рабочей поверхности в начале измерений с этиловым спиртом остались следы веществ с более высоким показателем преломления с предыдущих опытов (глицерин).

С учетом поправки на систематический сдвиг, получим следующие показатели преломления:

$$n_s = 1,3624 \pm 0,0005; \quad n_r = 1,3633 \pm 0,0005$$

#### 4 Вычисление показателей преломления веществ по формулам рефрактометрии

Проведем подготовительные расчеты: для воды, глицерина и этилового спирта вычислим молекулярную рефракцию  $R_M$  и поляризуемость молекулы  $\alpha$ , пользуясь формулами, указанными в 1 разделе отчета:

$$R_M = Mr = \frac{M n^2 - 1}{\rho n^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} N_A \alpha$$

Значения молекулярной массы  $M$  и плотности  $\rho$  возьмем из справочников; будем считать их точными. В качестве показателя преломления  $n$  подставим его среднее значение  $\langle n \rangle$  - среднее арифметическое из показателей, полученных методами скользящего луча и полного внутреннего отражения. Вычисления приведены в таблице 7. Погрешности величин сосчитаны в соответствии с правилами.

Пользуясь аддитивностью (4), запишем молекулярные рефракции воды, глицерина и этилового спирта через атомные рефракции элементов:

$$\begin{cases} R_{H_2O} = 2R_H + R_O, \\ R_{C_3H_8O_3} = 3R_C + 8R_H + 3R_O \\ R_{C_2H_6O} = 2R_C + 6R_H + R_O \end{cases}$$

Решив эту систему, получим выражения для атомных рефракций:

Соединение	$M$ , г/моль	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\langle n \rangle$	$r$ , см <sup>3</sup> /г
Вода	18,02	0,998	1,3329	0,2061
Глицерин	92,09	1,26	1,4705	0,2217
Этиловый спирт	46,07	0,789	1,3628	0,2817
Соединение	$R_M$ , см <sup>3</sup> /моль	$\Delta R_M$ , см <sup>3</sup> /моль	$\alpha$ , 10 <sup>-24</sup> см <sup>3</sup>	$\Delta\alpha$ , 10 <sup>-24</sup> см <sup>3</sup>
Вода	3,713	0,003	1,447	0,002
Глицерин	20,411	0,014	8,121	0,006
Этиловый спирт	12,978	0,010	5,164	0,004

Таблица 7: Вычисление молекулярных рефракций различных соединений

$$R_C = (2,32 \pm 0,04) \text{ см}^3/\text{моль}$$

$$R_H = (1,16 \pm 0,05) \text{ см}^3/\text{моль}$$

$$R_O = (1,40 \pm 0,06) \text{ см}^3/\text{моль}$$

Зная атомные рефракции углерода, водорода и кислорода, а также молекулярную рефракцию воды, получим молекулярные рефракции метилового спирта ( $CH_4O$ ), льда ( $H_2O$ ) и алмаза ( $C$ ), а затем и показатели преломления этих веществ, пользуясь теми же формулами:

$$R_M = Mr = \frac{M n^2 - 1}{\rho n^2 + 2} = q_1 R_1 + q_2 R_2 + \dots = q_1 A_1 r_1 + q_2 A_2 r_2 + \dots$$

$$r\rho = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \leftrightarrow n = \sqrt{\frac{2r\rho + 1}{1 - r\rho}}$$

Соответствующие вычисления приведены в таблице 8.

Соединение	$R_M$ , см <sup>3</sup> /моль	$M$ , г/моль	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$r\rho$ , см <sup>3</sup> /г	$\Delta r$ , см <sup>3</sup> /г	$n$	$\Delta n$
Метиловый спирт	8,35	32,04	0,79	0,207	0,004	1,33	0,03
Лед	3,713	18,02	0,91	0,18813	0,00014	1,3020	0,0013
Алмаз	2,32	12,07	3,25	0,625	0,011	2,45	0,08

Таблица 8: Вычисление молекулярных рефракций различных соединений и их показателей преломления

**Вывод:** 1) в работе оценена систематическая погрешность рефрактометра; проведены измерения показателей преломления трех стеклянных пластин, глицерина и этилового спирта. Без поправки на ошибку прибора в большинстве измерений метод полного отражения дает меньшие значения, однако после учета систематического сдвига показатель преломления вещества по методу полного отражения, наоборот, больше. Однако  $n_s$  и  $n_r$  отличаются не больше, чем на 0,1%, и с хорошей точностью совпадают со справочными данными. 2) Рассчитаны молекулярные рефракции имеющихся соединений и атомные рефракции их составляющих; поляризуемость веществ. Из соображений аддитивности рефракции, получены значения молекулярной массы и показателя преломления для метанола, льда и алмаза. Ошибка в расчетах составляет не более 2%.