

*Лабораторная работа №9*  
**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ  
ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ, ОСНОВАННЫЙ НА  
ЯВЛЕНИИ РЕФРАКЦИИ СВЕТА В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
ЛИНЗАХ**

*Цель работы* – ознакомление с методом определения показателя преломления жидких и твердых тел, основанным на явлении рефракции света в цилиндрических линзах, и его применение для контроля оптических параметров прозрачных тел цилиндрической формы и жидкостей.

Показатель преломления вещества  $n$  является одним из важнейших его параметров. Измерение показателя преломления широко применяется при определении структуры вещества, для контроля качества и состава различных веществ в химической, фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности. Существует много методов измерения показателя преломления диэлектрических материалов [23], но не все их можно использовать, если объект контроля (ОК) имеет специфическую форму, например, цилиндра, которая встречается во многих областях техники. Определение показателя преломления жидкостей, как правило, требует использования промышленных приборов, что не всегда доступно.

В данной работе предлагается простой метод определения показателей преломления жидкостей, находящихся в тонкостенных ( $\sim 0,5$  мм) пробирках цилиндрической формы, и твердых прозрачных тел в виде цилиндров.

В основе метода лежит явление преломления света в цилиндрических линзах [24], суть которого иллюстрирует рис. 9.1. Если прямая линия образует угол  $\alpha$  с осью цилиндра, то изображение линии поворачивается на угол  $\delta$  при наблюдении этой прямой через прозрачный цилиндр. Угол поворота  $\delta$  однозначно связан с углом  $\alpha$  и показателем преломления цилиндра  $n$ :

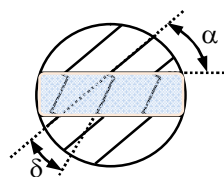


Рис. 9.1. Измерение  $n$  по углу поворота  $\delta$  изображения линии.

$$\delta = \arctg \left[ \frac{n}{2-n} \operatorname{tg} \alpha \right] - \alpha, \quad (9.1)$$

откуда следует, что

$$n = \frac{2 \cos \alpha \cdot \sin(\delta + \alpha)}{\sin(2\alpha + \delta)}. \quad (9.2)$$

Как видно из формулы (9.2), показатель преломления прозрачного цилиндра или жидкости, которая находится в кювете [25], не зависит от диаметра цилиндра или кюветы и определяется углами  $\alpha$  и  $\delta$ .

Экспериментальная схема для измерения показателя преломления с помощью предложенного метода приведена на рис. 9.2.

В схеме содержится источник света 1, расположенный в фокусе объектива коллиматора 2. Светофильтр 3 позволяет производить измерения в монохроматическом свете, при этом устраняется погрешность определения показателей преломления  $\Delta n$ , связанная с дисперсией.

Параллельный пучок лучей попадает на образец 6 (кювету, заполненную жидкостью, или прозрачный стержень цилиндрической формы) и освещает транспаранты с решеткой 5 и 5'. Образец расположен непосредственно на транспаранте 5 и закреплен

на трехкоординатном микропозиционере (на рис. не указан), позволяющем перемещать образец в различных направлениях.

Транспаранты представляет собой круг диаметром 80 мм с системой регулярно расположенных в плоскости линий толщиной 0,3 мм с шагом 5 мм (рис. 9.1). Транспаранты 5 и 5' выполнены в графической программе на компьютере и напечатаны на лазерном принтере на прозрачной пленке.

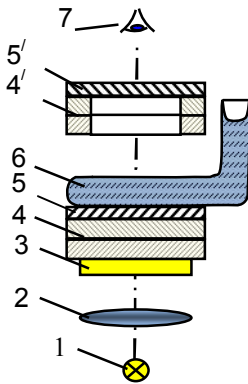


Рис. 9.2. Схема установки для измерения показателя преломления жидкостей.

Измерение углов с высокой точностью является сложной задачей, поэтому одним из достоинств метода является необходимость измерения всего двух углов  $\alpha$  и  $\delta$  для определения показателя преломления вещества по формуле 9.2. Для точного измерения углов используются гониометры 4 и 4' с точностью измерения  $\sim 1'$ .

Согласно соотношению (9.2) показатель преломления может быть определен при любом положении кюветы относительно линий решетки, т.е. при любом угле  $\alpha$ , (кроме  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$ , т.к. в этом случае при показателе преломления  $n < 2$  угол поворота  $\delta = 0^\circ$ ). Однако погреш-

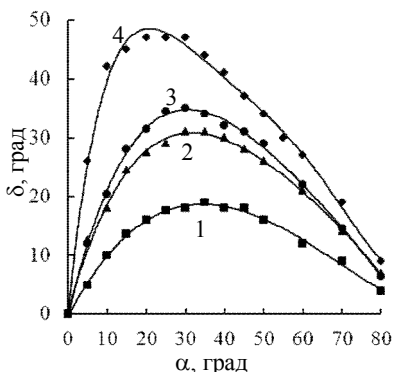


Рис. 9.3. Зависимость  $\delta = f(\alpha)$ :  
 1 –  $n = 1,33$ ; 2 –  $n = 1,51$ ; 3 –  $n = 1,57$ ;  
 4 –  $n = 1,73$ ,  
 точки – экспериментальные данные

$1,3 < n < 1,7$   $\delta_{\max}$  достигается при расположении оси кюветы перпендикулярно к линиям решетки под углами  $\alpha \sim 25^\circ - 35^\circ$ .

Оптимальный угол  $\alpha_{\max}$  может быть получен из уравнения (9.1) из условия экстремума  $\frac{d\delta}{d\alpha} = 0$ :

$$\alpha_{\max} = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{2-n}{n}}, \quad \delta_{\max} = \frac{\pi}{2} - 2\alpha_{\max}. \quad (9.3)$$

ность  $\Delta n$  в определении показателя преломления будет наименьшей для наибольшего угла поворота  $\delta$ . Для увеличения точности определения показателя преломления  $n$  кювету необходимо размещать под таким углом  $\alpha$ , при котором угол поворота  $\delta$  достигает максимальной величины  $\delta_{\max}$ . Зависимость  $\delta = f(\alpha)$  при  $n = \text{const}$  для четырех значений показателя преломления приведена на рис. 9.3. Как видно из рисун-

Однако для расчета  $\alpha_{\max}$  по соотношению (9.3) необходимо знать показатель преломления  $n$ . Если же он неизвестен, зависимость  $\delta = f(\alpha)$  можно получить экспериментально. Пример такой экспериментальной зависимости, полученной для веществ с различным значением  $n$ , представлен на рис. 9.3.

Данный метод можно модифицировать, используя цифровую камеру или цифровой фотоаппарат в схеме, приведенной на рис. 9.4. Для съемки цифровым фотоаппаратом 1 транспарант 2 помещается на стекло вместе с образцом 3 (цилиндрической кюветой с жидкостью или прозрачным стержнем), показатель преломления которого необходимо определить. Образец освещается снизу источником света 4. По полученным снимкам на компьютере с помощью стандартных (например, CorelDRAW, AutoCAD) или специальных программ определяются углы  $\alpha$  и  $\delta$ .

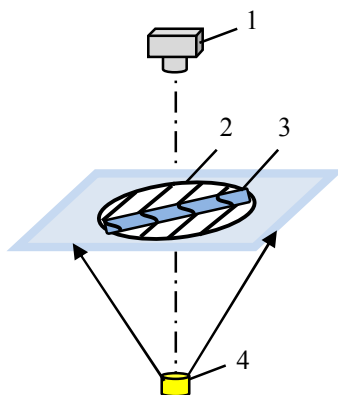
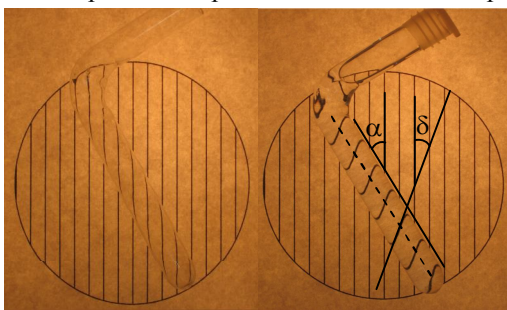


Рис. 9.4. Схема для съемки цифровым фотоаппаратом

На рис. 9.5а приведен снимок цилиндрической кюветы без жидкости,



а

б

Рис. 9.5. Цифровые снимки кюветы без жидкости (а) и кюветы, заполненной водой (б)

полученный с помощью цифрового фотоаппарата по схеме, изображенной на рис. 9.4. Изгиб изображения вблизи краев кюветы связан с преломлением стенок цилиндрической кюветы и aberrациями линзы и не зависит от показателя преломления жидкости. Линии, на-

блюдаемые через кювету, не поворачиваются, т.к. показатель преломления воздуха незначительно отличается от единицы.

При заполнении кюветы жидкостью (рис. 9.5б) изображения линий, наблюдаемых через жидкость, поворачиваются. Из-за изгиба линий изображения вблизи краев кюветы угол  $\delta$  необходимо измерять между наблюдаемой через жидкость линией прозрачного материала и линией, параллельной оси кюветы, т.к. формула (9.2) справедлива в параксиальном приближении.

На рис. 9.6 представлены некоторые примеры цифровых снимков твердых тел, изготовленных в виде прозрачных цилиндров, расположенных на прозрачном материале. Соответствующая обработка (измерение углов  $\alpha$  и  $\delta$ ) позволяет определить показатели преломления данных веществ.

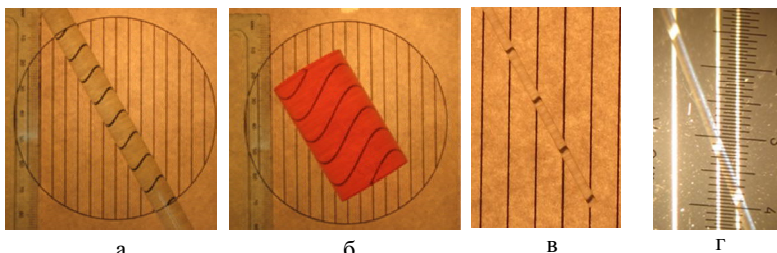


Рис. 9.6. Цифровые снимки различных прозрачных объектов:  
а – стеклянный цилиндр диаметром 10 мм, б – цилиндр из органического стекла диаметром 30 мм, в – стеклянный цилиндр диаметром 1 мм, г – оптическое волокно диаметром 0,15 мм.

Метод можно применять как к стержням обычных диаметров (рис. 9.6а, б), так и малых ( $\sim 1$  мм) диаметров (рис. 9.6в). Цилиндры меньшего диаметра можно фотографировать с помощью микроскопа. На рис. 9.6г приведен пример такой фотографии для стекловолокна диаметром 0,15 мм.

Достижимая точность измерения показателя преломления зависит от точности измерения углов  $\alpha$  и  $\delta$ , и погрешность определения показателя преломления может быть менее  $10^{-3}$  для одного измерения. Если необходимо уменьшить погрешность, можно выполнять несколько из-

мерений пар углов  $\alpha$  и  $\delta$ .

### ***Порядок выполнения работы.***

1. Определение показателя преломления жидкостей с использованием прозрачных цилиндрических кювет.
  - 1.1. Ознакомиться с устройством схемы измерения, изображенной на рис. 9.2.
  - 1.2. Поместить кювету с исследуемой жидкостью на транспарант 5. С помощью винтов трехкоординатного микропозиционера установить образец в поле зрения. Убедиться, что линии транспарантов 5 и 5' параллельны друг другу.
  - 1.3. Нижний транспарант 5 повернуть так, чтобы образующая цилиндра составляла с линиями решетки заданный угол  $\alpha$  (этот угол устанавливают с помощью гониометра 4). Затем повернуть верхний транспарант так, чтобы линии решетки прозрачного транспаранта 5' совпадали по направлению с линиями, наблюдаемыми через образец, и измерить угол  $\delta_1$  поворота изображения линии гониометром 4'.  $\delta$  определить по соотношению:

$$\delta = \delta_1 - \alpha \quad (9.4)$$

- 1.4. Для исследуемого образца определить несколько пар значений углов ( $\alpha_i$  и  $\delta_i$ ) и построить график зависимости  $\alpha$  от  $\delta$  (см. рис. 9.3).
  - 1.5. По графику определить значение  $\alpha_{max}$ , соответствующего максимальному значению угла поворота изображения линии  $\delta_{max}$ .
  - 1.6. Поместить кювету так, чтобы ее ось составила угол  $\alpha_{max}$  с линиями решетки транспаранта, и определить угол  $\delta_{max}$ .
  - 1.7. Определить показатель преломления исследуемой жидкости по формуле (9.2), используя значения углов  $\alpha_{max}$  и  $\delta_{max}$ .
  - 1.8. Измерить показатель преломления жидкости с помощью рефрактометра УРЛ-1 (см. работу №3). Сравнить полученные результаты.
2. Определение показателя преломления прозрачных цилиндров.
    - 2.1. Поместить исследуемый цилиндр на транспарант 5 (рис. 9.2) и вы-

полнить измерения согласно п. п. 1.2 – 1.7.

3. Определение показателя преломления с использованием компьютерных технологий.
  - 3.1. Кювету с жидкостью или прозрачный цилиндрический стержень поместить на стекло с транспарантом (рис. 9.4), и произвести съемку цифровым фотоаппаратом при угле  $\alpha \approx \alpha_{max}$  между образующей цилиндра и линиями транспаранта. При съемке цилиндров малого диаметра ( $< 1$  мм) использовать оптический микроскоп.
  - 3.2. По полученному снимку на компьютере с помощью стандартных или специальных программ определить углы  $\alpha$  и  $\delta$  и рассчитать показатель преломления  $n$ . Сравнить полученное значение  $n$  с результатом измерений по оптической схеме (рис. 9.2).



Рис.9.А.1. Окно программы «Refraction» после загрузки фотографии

Определение показателя преломления по цифровой фотографии с помощью специальной программы «Refraction».

1. Запустить Refraction.exe
2. Нажать кнопку «загрузить» и выбрать исходный файл (рис. 9.А.1). Предположим, это фотография с именем Image1.jpg.
3. В проводнике сделать копию файла IMG\_0468.xls -> Image1.xls и открыть его (табл. 9.А.1).
4. Определение угла наклона кюветы (рис.9.А.2).
- 4.1. С помощью щелчков левой и правой

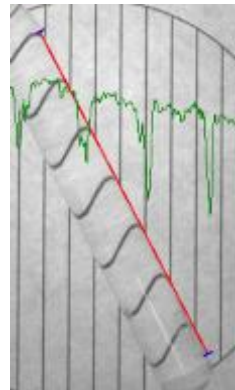


Рис. 9.А.2. Определение угла наклона кюветы



кнопками мыши на изображении выделить стенку кюветы (рис. 9.А.2). Чем длиннее красный отрезок – тем выше точность. Зеленый график обозначает изменение яркости исходного изображения под красным отрезком.

- 4.2. Отрегулировать длину синих отрезков с помощью ползунка. Они должны слегка выходить за пределы стенок кюветы. Чем длиннее эти отрезки – тем дольше будут вычисления.
  - 4.3. Отрегулировать «точность подбора (шагов на пиксель синих отрезков)». Чем меньше значение – тем быстрее вычисления и ниже точность.
  - 4.4. Нажать «Подбор значений (кювета)». *Принцип подбора основан на поиске наилучшего красного отрезка, соединяющего два синих отрезка. Критерий отбора – яркость под красным отрезком должна быть равномерна, т.е. с минимальным среднеквадратичным отклонением. Внимание: процесс вычислений прервать нельзя.*
  - 4.5. Если требуется высокая точность, то можно уменьшить длину синих отрезков и увеличить точность подбора. Т.е. повторять пункты 4.2 - 4.4 до получения требуемой точности.
  - 4.6. Из окошка «результат» скопировать значение в файл Image1.xls, ячейка В4 (угол наклона кюветы).
  - 4.7. Если требуется, то с помощью кнопки «Сохранить» можно сохранить полученную картинку для просмотра в графическом редакторе.
5. Определение угла наклона сетки

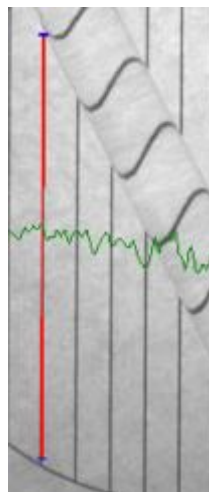


Рис.9.А.3. Определение угла наклона сетки

(рис. 9.А.3).

- 5.1. С помощью щелчков левой и правой кнопками мыши на изображении выделить линию сетки. Чем длиннее красный отрезок – тем выше точность. Зеленый график обозначает изменение яркости исходного изображения под красным отрезком.
  - 5.2. Отрегулировать длину синих отрезков с помощью ползунка. Они должны слегка выходить за пределы линии сетки. Чем длиннее эти отрезки – тем дольше будут вычисления.
  - 5.3. Отрегулировать «точность подбора (шагов на пиксель синих отрезков)». Чем меньше значение – тем быстрее вычисления и ниже точность.
  - 5.4. Нажать «Подбор значений (линия)». *Принцип подбора основан на поиске наилучшего красного отрезка, соединяющего два синих отрезка. Критерий отбора – красный отрезок должен идти как можно ближе к центру черной линии. Внимание: процесс вычислений прервать нельзя.*
  - 5.5. Если требуется высокая точность, то можно уменьшить длину синих отрезков и увеличить точность подбора. Т.е. повторять п. п. 5.2 – 5.3 до получения требуемой точности.
  - 5.6. Из окошка «результат» скопировать значение в файл Image1.xls, ячейка В3 (угол наклона сетки).
  - 5.7. Если требуется, то с помощью кнопки «Сохранить» можно сохранить полученную картинку для просмотра в графическом редакторе.
6. Измерение угла наклона линий в кювете. (рис. 9.А.4)
- 6.1. Выполняется аналогично пункту 5 (определение угла наклона сетки). Повторять по количеству линий сетки в кювете. Результаты заносить в ячейки В6-В12.
  7. Показатель преломления выведен в ячейке В18

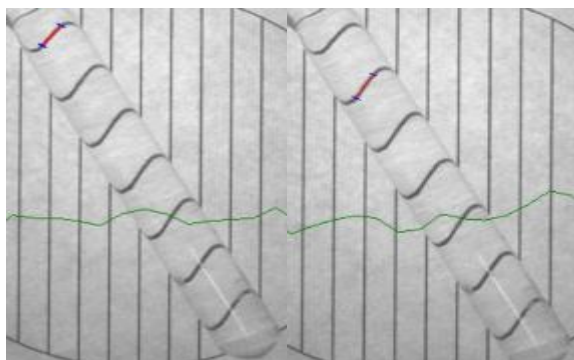


Рис.9.А.4 Определение угла линий в кювете

Таблица 9.А.1. Вид окна в программе MS Excel для файла Image1.xls

|    | В  | С  | Д |
|----|--|--|---|
| 2  | <b>измеренные данные вводить только в желтое поле:</b> |  |   |
| 3  | 178,6096   | угол наклона сетки   |   |
| 4  | 152,6728   | угол наклона кюветы  |   |
| 5  |  |  |   |
| 6  |  | угол наклона линии в кювете  |   |
| 7  | 158,5522   |  |   |
| 8  | 158,6293   |  |   |
| 9  |  |  |   |
| 10 |  |  |   |
| 11 |  | $n = \frac{2 \cos \alpha \cdot \sin(\delta + \alpha)}{\sin(2\alpha + \delta)}$ |   |
| 12 |  |  |   |
| 13 | 158,5908   | среднее арифметическое всех углов наклона линий в кювете                       |   |
| 14 |  |  |   |
| 15 |  |  |   |
| 16 | 25,9368  | alpha - угол между сеткой и кюветой  |   |
| 17 | 21,40925   | delta - угол между линиями в кювете и сеткой                                   |   |
| 18 | 1,381135   | n - результирующий показатель преломления                                      |   |

***Контрольные вопросы.***

1. Какое физическое явление лежит в основе метода определения показателя преломления, изучаемого в данной работе?
2. Показатели преломления каких веществ можно определять при помощи данного метода?
3. Зачем в измерительной схеме присутствует светофильтр?
4. Какие углы нужно измерить, чтобы определить показатель преломления?
5. Зачем в работе перед началом измерений предлагается построить

зависимость  $\delta = f(\alpha)$ ?

6. В каком случае погрешность  $\Delta n$  в определении показателя преломления будет наименьшей?
7. Как можно уменьшить погрешность измерения, если точность измерения углов  $\alpha$  и  $\delta$  недостаточна?
8. Чем обусловлен изгиб изображения вблизи краев кюветы или цилиндра?
9. Можно ли данный метод применять к цилиндрам малого диаметра? Большого диаметра? Каким образом?
10. Можно ли данный метод использовать как экспресс-метод определения показателя преломления жидкостей?