

## Лабораторная работа №8.

# ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА ОТ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА РЭЛЕЯ.

Оборудование: интерферометр ИТР-1, насос Комовского, кран вакуумный, манометр.

### 1. Описание целей работы

№	Конкретная цель	Критерий достижения цели
<u>Изучение теории измерений</u>		
1	Назовите условия, при которых источники можно считать когерентными.	Студент называет условия и указывает следствия. Цель не достигнута, если студент не показывает понимания фазовых зависимостей.
2	Оптическая разность хода лучей.	Студент без подготовки пишет формулу и дает объяснения. Цель не достигнута, если студент делает ошибки.
3	Принцип работы интерферометра.	Студент без подготовки изображает принципиальную схему интерферометра (рис. 2), отвечает на вопросы 1 - 4. Цель не достигнута, если студент делает ошибки.
4**	Объясните работу, интерферометра, привлекая понятие дифракции.	Студент отвечает на вопросы 6 – 9. Цель не достигнута, если студент делает грубые ошибки.
5	Зависимость показателя преломления газа от давления.	Студент выводит формулу (*) и называет условия, при которых она должна выполняться.
<u>Изучение экспериментальной установки.</u>		
6	Укажите конструктивные отличия прибора ИТР-1 от принципиальной схемы. Их назначение.	Студент указывает элементы и объясняет их назначение.
7	Назначение и устройство манометрической системы.	Показать части манометрической установки и объяснить их назначение.
8	Калибровка компенсатора.	Студент правильно объясняет цель калибровки и порядок её выполнения.
9	Определение показателя преломления воздуха в комнате во время измерений.	Студент умеет найти данные и посчитать $n_{\text{возд}}$ .

\*\* - для студентов физического факультета.

### Литература:

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М., 1977г.
2. Бутиков Е.И. Оптика. М., 1986 г.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М. 1960 г.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2, М., 1988 г.

### 1.1. Зависимость показателя преломления газов от давления.

Опыт и элементарная теория показывают, что показатель преломления  $n$  вещества при прочих неизменных условиях связан с его плотностью  $\rho$  следующим соотношением (см. [1]):

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{\rho} = const.$$

Для газов, находящихся при малых давлениях, написанное соотношение может быть упрощено, т.к.  $n \approx 1$ :

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{\rho} \approx \frac{(n-1)(n+1)}{3} \cdot \frac{1}{\rho} \approx \frac{2(n-1)}{3\rho} = const$$

или

$$\frac{n-1}{\rho} = const.$$

С другой стороны, ввиду того, что при постоянной температуре плотность газа пропорциональна давлению  $p$ , можно написать:

$$\frac{n-1}{\rho} = const \quad \text{или} \quad n-1 = kp, \quad (1)$$

где  $k$  - некоторый коэффициент пропорциональности. Выполняемый в работе эксперимент имеет целью отыскание зависимости  $n$  от  $p$ . В случае справедливости приведенных выше расчетов искомая зависимость согласно (1) должна быть линейной. При обычных давлениях, коэффициент преломления газов мало отличается от единицы и поэтому может быть измерен лишь интерференционным путем. В данной работе используется интерферометр Рэлея, предназначенный для измерения показателей преломления газов и жидкостей. Принцип действия прибора основан на явлении интерференции.

### 1.2. Принцип работы интерферометра Рэлея.

Явление интерференции наблюдается при наложении когерентных волн и заключается в том, что в одних точках волнового поля происходит усиление колебаний (интерференционные максимумы), а в других - ослабление колебаний (интерференционные минимумы). (См. описание работы №7).

Как известно, два независимых источника света не являются когерентными и не могут создать интерференционную картину. Для осуществления интерференции от обычного источника света его световой поток разлагают на две части, которые, проходя разными путями, встречаются вновь. Картина получается такой же, как от двух когерентных источников.

В интерферометре Рэлея роль мнимых когерентных источников света выполняют две параллельные узкие щели  $S_1$  и  $S_2$ , освещаемые параллельным пучком света (рис. 1). Пучок параллельных лучей создается с помощью коллиматора, состоящего из ярко освещенной щели  $S$  (служашей источником света), расположенной в фокальной плоскости линзы  $L_1$ . Дифрагмированные на щелях  $S_1$  и  $S_2$  волны собираются в фокальной плоскости объектива  $L_2$ , образуя интерференционную картину.

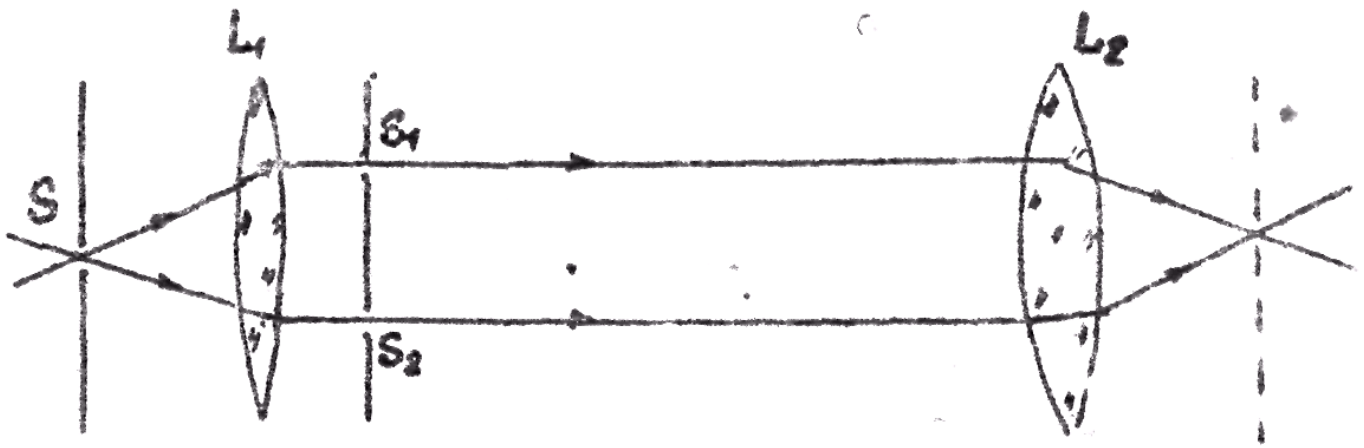


Рис.1. Принципиальная схема интерферометра.

Результат интерференции будет зависеть от разности хода лучей  $\Delta r = r_1 - r_2$ , где  $r_1$  - путь луча от источника  $S_1$  до точки наблюдения  $r_2$  - путь луча от источника  $S_2$ .

Если  $\Delta r = m\lambda$ , то в данной точке наблюдается максимум колебаний, если  $\Delta r = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$  - минимум.

Если на пути лучей поставить кюветы с различными веществами, то лучи пройдут через среды с различными показателями преломления:  $n_1$  и  $n_2$ . В этом случае, вместо геометрической разности хода  $\Delta r$  надо использовать оптическую разность хода:

$$\delta = |r_1 n_1 - r_2 n_2|.$$

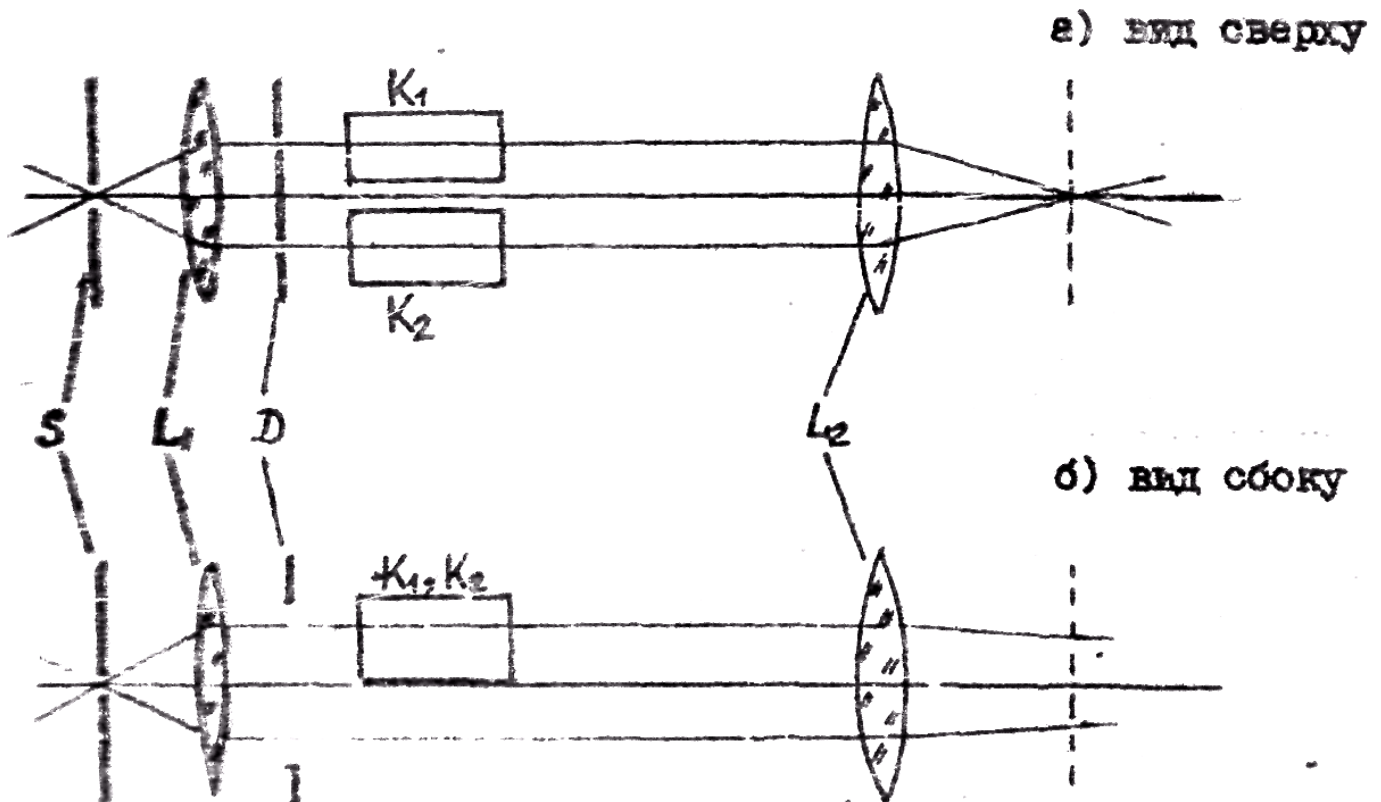


Рис.2. Введение кювет  $K_1$  и  $K_2$  в интерферометр Рэлея.

В интерферометре Рэлея между линзами  $L_1$  и  $L_2$  вводятся кюветы  $K_1$  и  $K_2$  (рис.2), содержащие исследуемые газы или жидкости. Кюветы имеют одинаковую длину  $l$ .

В нашей работе обе кюветы заполнены воздухом. Одна из них соединена с насосом, с помощью которого можно изменять давление воздуха в ней. В другой кювете состояние воздуха не меняется (давление атмосферное).

Рассмотрим образование системы полос. Если давление воздуха в кюветах одинаково, в центре интерференционной картины будет светлая полоса. Она является нулевым максимумом, так как оптическая разность хода лучей в этой точке равна нулю:

$$\delta = l \cdot n - l \cdot n = 0$$

По обе стороны от нулевого максимума располагаются темные полосы - минимумы, которым соответствует разность хода  $\delta = \pm \frac{\lambda}{2}$ . Следующим максимумам соответствует разность хода  $\delta = \pm \lambda$  и т.д. Таким образом, можно определить оптическую разность хода волн, соответствующую каждой интерференционной полосе.

Если в одной из кювет изменится показатель преломления, то система интерференционных полос сместится. Для центральной точки оптическая разность хода будет равна:

$$\delta = l \cdot n_1 - l \cdot n_2 = l(n_1 - n_2) = l\Delta n.$$

где  $\Delta n$  - изменение показателя преломления газа в кювете.

Если измерить разность хода  $\delta$ , то, зная длину кюветы  $l$  можно определить изменение показателя преломления  $\Delta n$ . Разность хода можно определить, подсчитав на сколько полос сместилась система, т.е. определив какой интерференционный максимум окажется в центре картины.

Если картина сместилась на  $m$  полос (в центре окажется  $m$  - ый максимум), то разность хода  $\delta = m\lambda$ .

Из  $l\Delta n = m\lambda$ , получим: 
$$\Delta n = \frac{m\lambda}{l}. \quad (2)$$

### Вопросы:

1. Покажите на схеме (рис.2) принципиальные элементы оптической схемы интерферометра Рэлея: коллиматор, диафрагму с двумя щелями, кюветы, плоскость наблюдения, окуляр. Укажите их назначение.
2. Что изменится, если кюветы  $K_1$  и  $K_2$  поместить между линзой  $L_1$  и диафрагмой Д?
3. Куда сместится центр интерференционной картины, если в кювете  $K_1$  будет оптически более плотная среда? ( $n_1 > n_2$ ).
4. Как будет выглядеть интерференционная картина, если щель заменить круглым отверстием?
5. Почему щель  $S$  должна быть достаточно узкой? Оцените её размер, исходя из данных прибора.

### 1.3. Дифракционная теория прибора.

Более подробно работу интерферометра Рэлея можно рассматривать как дифракцию Фраунгофера на двух щелях. Плоская волна, образованная коллиматором, дифрагирует на экране с двумя щелями. Если бы щель была одна, то распределение интенсивности  $I$  дифрагировавшего света по углам дифракции  $\varphi$  имело бы вид, показанный на рис.3 пунктиром. В центре дифракционной картины наблюдается широкий максимум нулевого порядка и с каждой стороны от него 1-2 дифракционных максимума  $\pm 1$ -го и  $\pm 2$ -го порядка. Угловая ширина центрального максимума  $\varphi_0 \approx \frac{\lambda}{a}$ , где  $a$  – ширина щели.

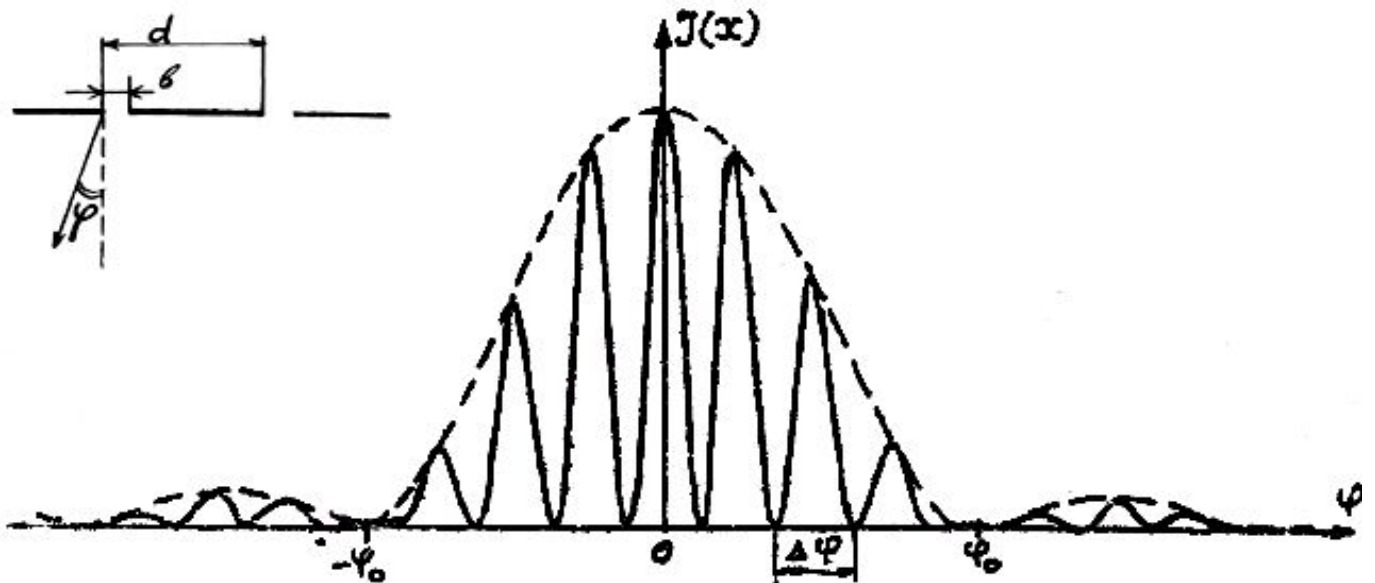


Рис.3. Распределение интенсивности света при дифракции Фраунгофера на двух щелях (сплошная кривая) и на одной щели (штриховая).

При наличии двух щелей нужно учесть интерференцию световых пучков, дифрагировавших на каждой щели, т.е. рассмотреть задачу дифракции Фраунгофера на двух щелях. Окончательное распределение интенсивности света по направлениям в интерференционной картине будет иметь вид, изображенный на рис.3 сплошной чертой.

Применяя принцип Гюйгенса - Френеля можно рассчитать интенсивность световых колебаний по направлениям  $\varphi$  (см. например, [1], [2] или [3]). Расчет показывает, что

$$J \sim \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot a \cdot \varphi}{\lambda}\right)}{\frac{\pi \cdot a \cdot \varphi}{\lambda}} \right]^2 \cdot \cos^2\left(\frac{\pi \cdot d \cdot \varphi}{\lambda}\right), \quad \sin \varphi \quad (3)$$

где  $d$  - расстояние между щелями (см. рис. 3).

Как видно из (3), зависимость  $J(\varphi)$  распадается на два множителя, первый из которых описывает распределение интенсивности в дифракционной картине Фраунгофера от одной щели, а второй обусловлен интерференцией световых пуч-

ков. Интерференционные максимумы отстоят друг от друга на равные угловые расстояния  $\Delta\varphi = \frac{\lambda}{d}$ . Тогда в пределах первого дифракционного максимума располагается  $K$  интерференционных полос:

$$K = \frac{2\varphi_0}{\Delta\varphi} = \frac{2d}{a}$$

### Вопросы:

6. В чём состоит принцип Гюйгенса-Френеля?
7. Какой вид имеет дифракционная картина Фраунгофера от одной щели? От чего и как зависит угловая ширина центрального максимума?
8. Как выглядит интерференционная картина от двух когерентных пучков света? Как выглядит интерференционная картина двух пучков света, дифрагировавших на щелях? От чего зависит число интерференционных максимумов, расположенных в пределах первого дифракционного максимума?
9. Найдите в формуле (3) дифракционный и интерференционный члены.

## 2. Описание экспериментальной установки.

### 2.1. Конструкция интерферометра ИТР-1.

Оптическая схема интерферометра ИТР-1 изображена на рис.4а (вид сбоку) и 4б (вид сверху).

Свет от источника 1 падает на щель 2, расположенную в фокальной плоскости объектива коллиматора 3. Параллельный пучок лучей, выходящих из объектива, разделяется двумя щелями диафрагмы 4. Эти щели можно рассматривать как источники вторичных когерентных световых волн.

Полученные световые пучки проходят через объектив 6, причем верхние пучки идут через кюветы 5, а нижние минуют кюветы. По этой причине в фокальной плоскости объектива интерферируют две пары взаимно когерентных пучков света и в окуляр 7 видны две системы интерференционных полос. Верхняя полоса образуется в результате интерференции пучков, прошедших через кюветы, нижняя - пучками, не прошедшими через кюветы. Нижняя система полос в процессе работы остается неподвижной и служит индикатором, относительно которого определяется сдвиг верхней системы полос.

Смещение может происходить и не на целое число полос, тогда  $m$  будет дробным числом. Использование в качестве индикатора неподвижной нижней системы полос позволяет определить очень малые смещения верхней интерференционной картины (до 0,1 ширины отдельной полосы).

Кроме этого, указанный вид индикатора оказывается нечувствительным к изгибам и перекосам оптической системы, т.к. обе системы полос (и верхняя, и нижняя) при этом смещаются одинаково, не изменяя взаимного расположения. Непосредственное измерение показателя преломления газа в кювете производится компенсационным методом. На пути пучков, прошедших через кюветы, помещают

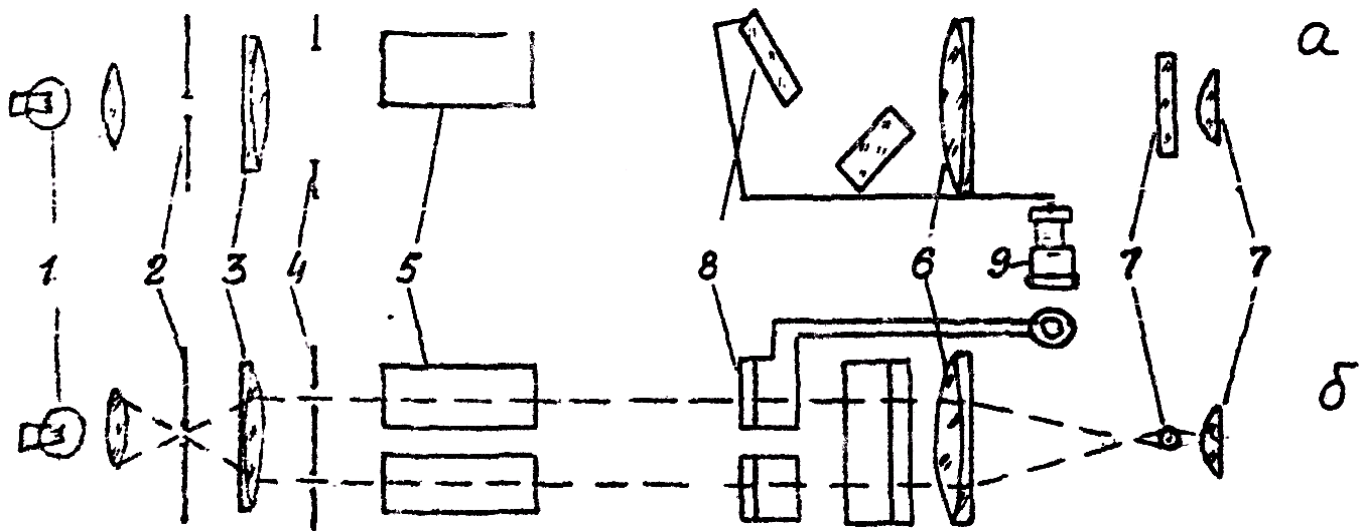


Рис.4.

компенсатор 8 (рис.4), представляющий собой устройство, состоящее из двух наклонных плоскопараллельных стеклянных пластинок. Одна из пластинок закрепляется неподвижно, а угол наклона второй можно изменять. При этом изменяется оптическая разность хода лучей, образующих верхнюю систему интерференционных полос, и происходит смещение этой системы. Таким образом, можно добиться сдвига верхней системы полос в направлении, противоположном смещению этих полос, (вызванному изменением показателя преломления газа в одной из кювет) т.е. скомпенсировать создаваемую при этом разность хода лучей.

Пластинки компенсатора поворачиваются рычагом, соединенным с микрометрическим винтом, установленным на интерферометре вблизи окуляра. Смещение полос, т.е. перемещение компенсатора, осуществляется микровинтом 9. Источником света в интерферометре служит лампа накаливания, включаемая через понижающий трансформатор. В свете этой лампы центральная интерференционная полоса (нулевой максимум) будет белой, а полосы, расположенные справа и слева, будут симметрично окрашены.

## 2.2. Манометрическая система.

Манометрическая часть установки служит для создания определенных давлений воздуха в одной из кювет. Она состоит из насоса Комовского (1), манометра (2) и сосуда (3) для выравнивания скачков давления (рис.5).

Воздушный кран *а* открывается в воздух, с его помощью можно восстановить в системе атмосферное давление. С помощью кранов *б* и *в* воздух под давлением подается в одну из кювет. Другая кювета открыта и является эталонной, т.к. давление в ней всегда равно атмосферному давлению в помещении.

Интерферометр ИТР-1 позволяет измерить малые разности показателей преломления жидкостей и газов с точностью до  $10^{-8}$ .

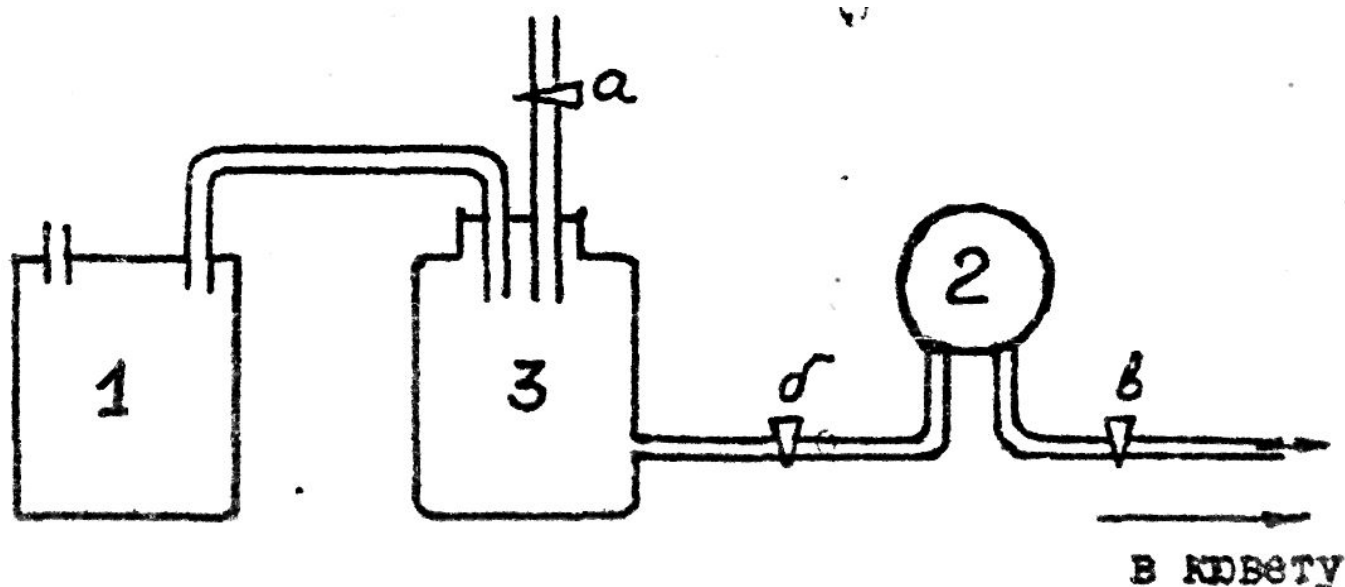


Рис.5.

### 2.3. Калибровка компенсатора.

Перед началом измерений следует прокалибровать компенсатор и установить начало отсчета. Для этого открывают все воздушные краны манометрической системы и, выждав 2-3 минуты для установления равновесия, замечают деление барабана компенсатора, при котором системы интерференционных полос совпадают друг с другом. Совмещение производится по центральной нулевой полосе (она выделена с обеих сторон двумя темными полосами). Это деление барабана  $N_0$  и является началом отсчета при последующих измерениях. Опыт необходимо провести несколько раз, чтобы убедиться, что результат повторяется (разброс в показаниях, не должен превышать одного деления по барабану).

Затем следует проградуировать барабан компенсатора. Для этого последовательно совмещают первую, вторую и т.д. подвижные полосы с нулевой полосой неподвижной картины и записывают соответствующие отсчеты по барабану. При смещении верхней картины на одну полосу разность хода меняется на длину волны. При градуировке нужно использовать все полосы, наблюдаемые в окуляр. Результаты изображаются на графике  $N(\delta)$ , где  $N$  - отсчет по барабану,  $\delta$  - разность хода в  $\lambda$ .

**NB!** Градуировка будет точнее, если использовать световой фильтр, выделяющий узкий интервал длин волн. При пользовании белым светом среднее значение длины волны принимается равным  $\lambda = 550$  нм.

### Выполнение работы

1. Включите осветительную лампу интерферометра через трансформатор в сеть и убедитесь, что в окуляре видны две системы интерференционных полос. Отрегулируйте накал лампочки осветителя так, чтобы яркость интерференционной картины была наиболее удобной для наблюдателя. Вращением накатанного кольца окуляра добейтесь максимальной четкости видимой картины.



2. Откалибруйте компенсатор согласно п.2.3. Постройте градуировочный график.
3. Закройте кран  $a$ , откройте краны  $b$  и  $v$ , соедините кювету прибора с насосом и манометром. Проверьте установку на герметичность. Для этого надо создать насосом пониженное давление в кювете (около 0,5 по манометру), закрыть кран  $b$  и, выждав 1-2 мин. для установления равновесия, наблюдать затем в течение 10 мин. за изменением давления по манометру. За это время давление не должно изменяться более чем на 0,1 кгс/м<sup>2</sup>.
4. Откройте кран  $b$  и создайте пониженное давление около 0,1 по манометру. Опять поверните ручку крана в положение «откл.» и, выждав 1-2 мин. для установления равновесия, произведите совмещение интерференционных полос (не менее трех раз). По барабану микрометра возьмите соответствующие отсчеты  $N$  и усредните.
5. Аналогичную операцию и измерения повторите, уменьшая давление через каждые 0,1 (вплоть, до 1). Значения избыточных давлений и соответствующие отсчеты  $N_i$  (по шкале барабана) запишите в таблицу.
6. По калибровочному графику найдите разность хода  $\delta_i$  для каждого значения давления  $\Delta P_i$ .
7. Вычислив по формуле (2)  $\Delta n_i$  для каждого значения давления  $\Delta P_i$ , постройте график зависимости  $\Delta n$  от  $\Delta P$ . Длина кюветы  $l = 10$  см. Определите из наклона прямой среднее значение отношения  $\frac{\Delta n}{\Delta P}$  и по формуле:

$$\Delta n = \frac{n_{\text{возд.}} - 1}{P_{\text{возд.}}} \Delta P, \quad (4)$$

где  $P_{\text{возд.}}$  и  $n_{\text{возд.}}$  - исходные значения давления воздуха и его показателя преломления; вычислить  $\Delta n$  (давление  $P_{\text{возд.}}$  взять по барометру и пересчитать в кгс/м<sup>2</sup>).

8. Так как  $\Delta n_i = n_{\text{возд.}} - n_i$ , то легко найти  $n_i$ :

$$n_i = n_{\text{возд.}} - \Delta n, \quad (5)$$

где  $n_{\text{возд.}}$  - показатель преломления воздуха в открытой кювете,  $n_i$  - показатель преломления воздуха в кювете с изменяемым давлением. Ввиду того, что значение коэффициента преломления воздуха зависит от давления, а в таблицах физических величин приводится значение  $n_0$  для температуры  $t = 0^\circ\text{C}$  и давления  $p_0 = 760$  мм.рт.ст.,  $n$  воздуха в помещении для условий опыта можно найти, пользуясь следующей формулой:

$$n_{\text{возд.}} = 1 + \frac{n_0 - 1}{\left(1 + \frac{t}{273}\right)} \cdot \frac{P_{\text{возд.}}}{760}, \quad (6)$$

где  $t$  - температура в  $^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{возд.}}$  - давление в мм.рт.ст. в комнате во время опыта. Используя формулы (5) и (6) найдите значение  $n_i$  для каждого значения давления  $\Delta P_i$  и постройте график  $n_i(P_i)$ . Проанализируйте его.

### Контрольные вопросы.

1. Почему при отсчете оптической разности хода двух лучей (рис.2) не принимается во внимание объектив  $L_2$ ?
2. Почему темные полосы, наблюдаемые в интерферометре, имеют цветные каемки?
3. Точность совмещения полос в данном приборе равна около  $\frac{1}{30}$  ширины полосы. Какова при этом погрешность в определении разности показателей преломления газа в кюветах?
4. Для чего применяются интерферометры?

### Литература.

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М., 1977. §44,45.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. ч.1. П., М., 1978.
3. Бутиков В.И. Оптика. М., 1986. с. 284-297.
4. Лабораторные занятия по физике (Под ред. Гольдина Л.Л.) М., 1983. с.434-440.