

535(07)

О – 627

№5111



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Южный федеральный университет»

**КАФЕДРА ФИЗИКИ**

**ОПТИКА**

Практикум по физике

(для укрупненных групп направлений подготовки:  
математические и естественные науки;  
инженерное дело, технологии и технические науки)

**ЕГФ**

Таганрог 2013

УДК 535 (076.5)

Составители: Куповых Г.В. (№501); Нестюрина Е.Е., Филиппева Н.Н. (№502, 504.-2, 506); Погорелов Е.Н., Филиппева Н.Н. (№503); Колпачева О.В. (№504.-1); Доценко И.Б. (№505); Гатько Л.Е. (№507); Какурин Ю.Б. (№508), Какурина Н.А. (№509).

Оптика: Практикум по физике. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 115 с.

Содержит необходимый теоретический материал для выполнения лабораторных работ по оптике, схемы установок и последовательность выполнения заданий.

Табл. 1. Ил. 44. Библиогр.: 6 назв.

Рецензент Ю.П. Пасичный, канд. техн. наук доцент кафедры физики ЮФУ.

## **501. ИЗУЧЕНИЕ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ СРЕД**

### **501.1. Цель работы**

Определение показателя преломления прозрачных сред в процессе опыта.

### **501.2. Разделы теории**

Основные законы оптики. Полное внутреннее отражение [1. Гл. 21, §165]; [2. Гл. XVI, §115]; [3. Гл. 3, 3.6].

### **501.3. Приборы и принадлежности**

Рефрактометр, микроскоп, микрометр, набор пробирок с исследуемыми жидкостями, набор стеклянных пластин.

### **501.4. Теоретическое введение**

Геометрическая оптика – предельный случай волновой оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах и условия получения изображений в системах, в которых длину волны света можно считать бесконечно малой (более строгое определение будет дано при изучении явления дифракции света). Для описания оптических явлений вводится понятие светового луча, под которым понимается направление, по которому световой волной переносится энергия. Основные законы геометрической оптики, установленные опытным путем следующие.

1. *Закон прямолинейного распространения света:* в однородной среде свет распространяется прямолинейно.

2. *Закон независимого распространения лучей:* отдельные лучи распространяются независимо. Если в какой-либо точке

лучи сходятся, то освещенности, создаваемые ими, складываются.

3. *Закон отражения*, который устанавливает изменение направления луча в результате падения на отражающую (зеркальную) поверхность: падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к отражающей поверхности в точке падения, и эта нормаль делит угол между лучами на две равные части (рис. 501.1), т.е. угол отражения ( $\alpha'$ ) равен углу падения ( $\alpha$ ).

4. *Закон преломления*, который устанавливает изменение направления луча при переходе из одной однородной среды в другую: падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к преломляющей поверхности в точке падения луча (рис. 501.1), а направления этих лучей связаны соотношением

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} . \quad (501.1)$$

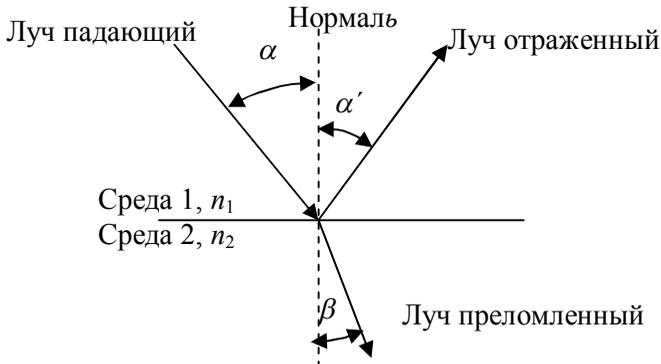


Рис. 501.1

Величина  $n_{21}$  называется относительным показателем преломления (второй среды по отношению к первой). Относительный показатель преломления определяется через абсолютные показатели преломления сред  $n_1$  и  $n_2$  как

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{или} \quad n_{21} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Абсолютный показатель преломления среды равен отношению скорости распространения света ( $c$ ) в вакууме к скорости распространения света в данной среде ( $v$ )

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

Вещество с большим показателем преломления называется оптически более плотным.

Используя выражение (501.1), закон преломления света можно записать следующим образом:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta.$$

Из этой формулы следует, что при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную ( $n_1 > n_2$ ) преломленный луч отклоняется от направления падающего луча к границе раздела двух сред. Увеличение угла падения  $\alpha$  сопровождается более быстрым ростом угла преломления  $\beta$ , и по достижении углом  $\alpha$  значения  $\alpha_{\text{пред}} = \arcsin n_{21}$  угол  $\beta$  становится равным  $\pi/2$ . Угол  $\alpha_{\text{пред}}$  называется предельным углом (рис. 501.2).

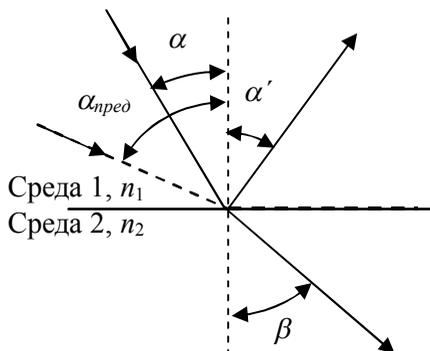


Рис. 501.2

Энергия, которую несет с собой падающий луч, распределяется между отраженным и преломленным лучами. По мере

увеличения угла падения интенсивность отраженного луча растет, интенсивность же преломленного убывает, обращаясь в ноль при предельном угле. При углах падения от  $\alpha_{пред}$  до  $\pi/2$  свет во вторую среду не проникает, интенсивность отраженного луча равна интенсивности падающего. Это явление называется *полным внутренним отражением*.

При преломлении света сложного, немонахроматического состава происходит его разделение на составные цвета в спектр. Явление, обусловленное зависимостью показателя преломления вещества от длины волны (частоты) проходящего света, называется *дисперсией света*. Величины  $\frac{dn}{d\lambda}$  и  $\frac{dn}{d\nu}$ , показывающие скорость изменения показателя преломления при изменении длины волны ( $\lambda$ ) и частоты ( $\nu$ ), используют для характеристики дисперсии. При  $\frac{dn}{d\lambda} < 0$  дисперсия вещества увеличивается по мере перехода от длинных волн к коротким. Такая дисперсия называется *нормальной*. В случае  $\frac{dn}{d\lambda} > 0$  дисперсию называют *аномальной*. Она наблюдается вблизи полос поглощения вещества.

Дисперсионную способность вещества характеризуют *средней дисперсией* ( $n_F - n_C$ ), где  $n_F$  - показатель преломления для волн длиной 486,1 нм (синяя линия водорода,  $F$ ), а  $n_C$  - показатель преломления для волн длиной 656,3 нм (красная линия водорода,  $C$ ). На практике обычно используется безразмерная величина *коэффициент дисперсии* или *число Аббе*. Число Аббе ( $\gamma$ ) определяется по формуле

$$\gamma = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C},$$

где  $n_D$  - показатель преломления для  $\lambda = 589,3$  нм (среднее значение из длин волн двух близких желтых линий натрия).

Средняя дисперсия и число Аббе используются при расчетах сложных систем для оптических наблюдений, фотографиро-

вания и микроскопии (ахроматические призмы, сложные спектральные призмы, спектральные призмы прямого зрения, ахроматические линзы для объективов биноклей и фотоаппаратов, объективы-апохроматы для микроскопов). Чем меньше значение числа Аббе, тем больше искажения («паразитная» дисперсия света, проходящего через оптическую систему). Из-за неодинаковой преломляемости лучей различных длин волн, параллельный пучок белого света после линзы даст изображение предмета с цветными контурами, которых у предмета нет (*хроматическая аберрация*).

Значения основных характеристик для промышленных оптических стекол:

Физическая величина	Обозначение	Значение
Абсолютный показатель преломления	$n_D$	1,43–2,17
Средняя дисперсия	$(n_F - n_C) \times 10$	639–3178
Коэффициент дисперсии (число Аббе)	$\gamma$	17–95

### 501.5. Описание установки и вывод расчетных формул

Рефрактометр предназначен для непосредственного измерения показателя преломления жидкостей и твердых тел, их средней дисперсии, а также для экспресс-анализа определения концентраций водных, спиртовых, эфирных и других растворов по показателю преломления  $n$ .

Принцип действия рефрактометра (рис.501.3) основан на явлении полного внутреннего отражения при прохождении светом границы раздела двух сред с разными показателями преломления. Прибор позволяет исследовать вещества, показатель преломления которых меньше показателя преломления измерительной призмы. **Все измерения выполняются в белом свете.**

#### *1. Определение показателя преломления прозрачных жидкостей*

Определение показателя преломления прозрачных жидкостей проводится в проходящем свете (метод скользящего луча).

Несколько капель исследуемой жидкости помещают между двумя гипотенузными гранями призм *I* и *II* (рис. 501.4). Призма *I* с хорошо отполированной плоской гранью *AB* является измерительной, а призма *II* с матовой гранью *A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>* – осветительной.

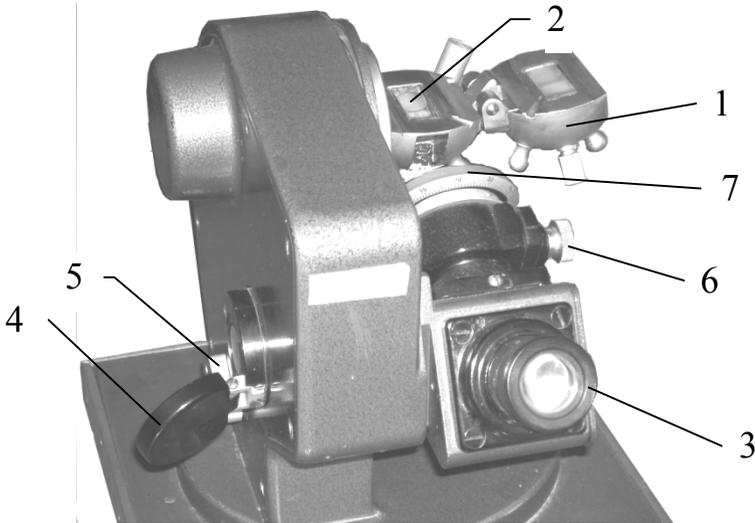


Рис. 501.3

От источника света лучи падают на грань  $C_1B_1$ , преломляются и попадают на матовую поверхность  $A_1B_1$ . Вследствие рассеивания света матовой поверхностью в исследуемую жидкость входят лучи различных направлений. Далее они проходят слой исследуемой жидкости и падают на поверхность  $AB$  призмы *I*. Так как показатель преломления исследуемой жидкости меньше показателя преломления измерительной призмы *I*, то лучи всех направлений, преломившись на границе жидкости и стекла, войдут в призму *I*.

По закону преломления имеем

$$n \sin i' = n_c \sin i, \quad (501.2)$$

где  $n$  – показатель преломления исследуемой жидкости;  $i'$  – угол

падения луча;  $n_c$  – показатель преломления измерительной призмы;  $i$  – угол преломления луча.

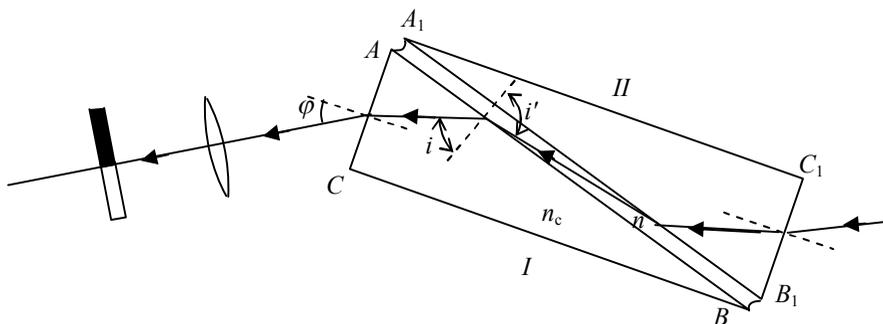


Рис. 501.4

Из уравнения (501.2) следует:

$$\sin i = \frac{n \sin i'}{n_c}. \quad (501.3)$$

С увеличением угла  $i'$  угол  $i$  также увеличивается, достигая максимального значения при угле падения  $i' = 90^\circ$ , т.е. когда падающий луч скользит по поверхности  $AB$ .

Максимальное значение угла преломления луча, соответствующее углу падения  $90^\circ$ , называется предельным углом преломления.

Так как зазор между призмами  $I$  и  $II$  мал, то можно приблизительно считать, что лучи с наибольшим углом падения являются скользящими. Подставляя значение  $i' = 90^\circ$  в формулу (501.3), получим

$$\sin i = \frac{n}{n_c},$$

откуда  $n = n_c \sin i$ .

В действительности формула для определения показателя преломления несколько сложнее, так как выходящие из призмы  $I$  лучи преломляются на грани  $AC$ .

Если на пути лучей, выходящих из призмы, поставить зри-

тельную трубу, то нижняя часть её поля зрения будет освещена, а верхняя останется темной. Получающаяся граница света и тени определяется лучом, выходящим из призмы под минимальным углом  $\varphi$ .

Наблюдая в окуляр 3 зрительной трубы рефрактометра (см. рис. 501.3), совмещают границу раздела света и тени с перекрестием визирной сетки и непосредственно по шкале прибора снимают отсчеты величины показателя преломления.

Вследствие явления дисперсии в белом свете граница раздела будет окрашенной. Для устранения окрашенности наблюдаемой границы раздела служит компенсатор, состоящий из двух призм прямого зрения (призм Амичи). Маховиком 6 можно поворачивать призмы одновременно в разные стороны, меняя при этом дисперсию компенсатора и устраняя цветную кайму границы раздела (при повороте барабана на  $180^0$  дисперсия компенсатора пройдет все значения от нуля до двойного значения дисперсии одной призмы). С компенсатором связан барабан 7 со шкалой (см. рис. 501.3). Шкала дисперсионного лимба барабана 7 разделена на 120 частей, 60 делений –  $180^0$ . По шкале определяют параметр дисперсии  $Z$ . Параметр дисперсии  $Z$  позволяет рассчитать среднюю дисперсию вещества.

## *2. Определение показателя преломления прозрачных твердых тел*

Показатель преломления прозрачных твердых тел, если он меньше показателя преломления призм  $n_c$ , можно измерять рефрактометром, поместив образец в виде тонкой пластины между призмами. Существуют и другие методы определения показателя преломления прозрачных твердых тел, например при помощи микроскопа. Этот способ применим для измерения показателей преломления любых твердых прозрачных тел.

Микроскоп представляет оптическую систему, состоящую из двух ступеней увеличения: 1 – обеспечивается объективом (полезное увеличение); 2 – обеспечивается окуляром. Предмет, помещенный вблизи главного фокуса объектива, образует за объективом действительное, увеличенное и перевернутое изображение. Это промежуточное изображение рассматривается в оку-

ляр, как в увеличительное стекло. Окончательное увеличенное изображение, наблюдаемое через окуляр, является мнимым, расположенным на расстоянии наилучшего видения от глаза наблюдателя. Приблизительно определить увеличение микроскопа можно, умножив увеличение объектива на увеличение окуляра. Например, увеличение микроскопа с 8-кратным объективом и 10-кратным окуляром будет  $8 \times 10 = 80$  крат. На объективе указывается его собственное увеличение и числовая апертура. На оправе окуляра наносится его собственное увеличение.

В основе метода измерений лежит явление кажущегося уменьшения толщины стеклянной пластинки вследствие преломления лучей на границе раздела двух сред. Наблюдаемая точка  $S$  расположена на нижней поверхности пластинки (рис. 501.5), луч 1, падающий перпендикулярно к верхней поверхности, пройдет без преломления, а лучи 2 и 2' преломятся и выйдут в воздух над пластинкой под углом  $\beta$ .

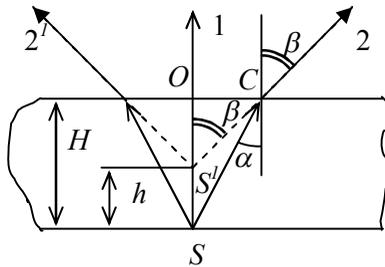


Рис. 501.5

На продолжении этих лучей в точке их пересечения с лучом 1 получим мнимое изображение  $S'$  наблюдаемой точки  $S$ . Толщина пластинки зрительно уменьшилась на величину  $h$ . Через верхнюю поверхность пластинки лучи выходят в среду оптически менее плотную ( $n_{\text{возд.}}=1$ ). Закон преломления света запишется в виде

$$\frac{1}{n} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (501.4)$$

где  $n$  – показатель преломления пластинки.

Углы  $\alpha$  и  $\beta$  малы, следовательно, их синусы можно при-

равнять к тангенсам. Вместо равенства (501.4) получаем

$$\frac{1}{n} = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\beta}. \quad (501.5)$$

После подстановки  $\operatorname{tg}\alpha = |OC|/H$  и  $\operatorname{tg}\beta = |OC|/(H-h)$  в формулу (501.5) получаем величину  $n$ , равную

$$n = \frac{H}{H-h}. \quad (501.6)$$

Формула (501.6) является расчетной при измерении показателя преломления прозрачных твердых тел с помощью микроскопа. Определение показателя преломления сводится к измерению действительной и кажущейся толщины пластинки. Для проведения измерений на тубусе микроскопа закреплен микрометр 1 (рис.501.6). Цена деления большой круглой шкалы 0,01 мм, а малой – 1 мм.

Для определения кажущейся толщины пластинки на ее верхнюю и нижнюю поверхности нанесены риски друг против друга. Пластинку кладут на предметный столик микроскопа. Перемещая тубус микроскопа, добиваются четкого изображения риски на нижней поверхности пластинки, затем на верхней поверхности, снимая соответствующие отсчеты  $h_1$  и  $h_2$  по шкалам микрометра. Разность полученных отсчетов равна кажущейся толщине пластинки:

$$H - h = h_1 - h_2.$$

Действительную толщину пластинки  $H$  измеряют микрометром. Подставляя измеренные значения  $H$  и  $(h_1 - h_2)$  в формулу (501.6), находят неизвестный показатель преломления:

$$n = \frac{H}{h_1 - h_2}. \quad (501.7)$$

### **501.6. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений**

#### **Упражнение 1. Измерение показателя преломления жидких сред при помощи рефрактометра.**

1. Откинуть верхнюю часть измерительной головки 1 реф-

рактометра (см. рис. 501.3). На поверхность измерительной призмы 2 нанести пипеткой 1–2 капли исследуемой жидкости и аккуратно закрыть измерительную головку.

2. Изменяя положение зеркала 4, подсветить шкалу рефрактометра. Вращая кольцо с насечкой окуляра 3, настроить резкое изображение перекрестия визирной сетки и шкалы рефрактометра.

3. Наблюдая в окуляр и вращая маховик 5, найти границу раздела света и тени, совместить ее с перекрестием.

4. Вращая маховик 6, добиться устранения спектральной (радужной) размытости границы света и тени. Вновь совместить (маховик 5) полученную четкую границу света и тени с перекрестием визирной сетки. Снять значение показателя преломления по шкале рефрактометра с точностью до тысячных долей.

5. Открыть измерительную головку. Удалить салфеткой остатки исследуемой жидкости. Тщательно протереть призмы.

6. Произвести указанные измерения по пп.1–4 для других растворов, число которых взять по указанию преподавателя. Результаты записать в таблицу.

7. Проанализировать полученные результаты измерения показателя преломления жидкостей.

## **Упражнение 2. Измерение средней дисперсии воды.**

1. Откинуть верхнюю часть измерительной головки 1 рефрактометра (см. рис. 501.3). На поверхность измерительной призмы 2 нанести пипеткой 1–2 капли дистиллированной воды и аккуратно закрыть измерительную головку.

2. Определить параметр дисперсии  $Z$ . Наблюдая в окуляр и вращая маховик 5, найти границу раздела света и тени, совместить ее с перекрестием. Добиться устранения (маховик 6) спектральной (радужной) размытости границы света и тени. Вновь совместить (маховик 5) полученную четкую границу света и тени с перекрестием визирной сетки. Записать значение отсчета двигающейся шкалы барабана 7, соответствующее красной точке на неподвижной части барабана 7. Это значение  $Z_1$ .

Продолжая вращать маховик 6 в том же направлении, повторно добиться четкой границы раздела света и тени. Считать значение отсчета шкалы барабана 7 –  $Z_2$ . Считывание делений шкалы барабана 7 производить слева направо. Сделать не менее трех отсчетов с двух сторон барабана и найти среднее арифметическое  $Z$ .

3. По формуле  $(n_F - n_C) = A + B\sigma$  вычислить величину средней дисперсии воды. Коэффициенты  $A, B$  определяют по показателю преломления  $n_D$  из табл. 1, коэффициент  $\sigma$  – по среднему значению  $Z$  из табл. 2. Если величина параметра дисперсии  $Z > 30$ , то коэффициент  $\sigma$  принимает отрицательное значение (табл. 1 и 2 см. на установке).

4. Определить коэффициент дисперсии (*число Аббе*) по формуле

$$\gamma = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C},$$

где  $n_D$  – показатель преломления дистиллированной воды, измеренный в упр.1.

5. Сравнить полученные результаты со справочными данными для воды.

### **Упражнение 3. Определение концентрации водного раствора спирта.**

1. Произвести измерения показателей преломления эталонных растворов (см. упр.1). Начать измерения следует с дистиллированной воды, затем спиртовые растворы в порядке увеличения концентрации эталонных проб. По полученным результатам построить градуировочный график – зависимость показателя преломления от концентрации раствора  $n = n(C)$ . График вычертить на миллиметровой бумаге в возможно большем масштабе.

2. Измерить показатель преломления пробы исследуемого раствора.

3. Определить с помощью градуировочного графика про-

центное содержание спирта в исследуемом растворе (пробе).

4. Проанализировать полученные результаты измерения показателя преломления водных растворов спирта.

#### **Упражнение 4. Измерение показателя преломления прозрачных твердых тел при помощи микроскопа.**

***Внимание: при настройке резкости следите за тем, чтобы объективом не раздавить исследуемый образец!***

1. Поставить микроскоп на лабораторном столе, расположив шкалу микрометра прямо напротив себя. Наблюдая в окуляр, повернуть зеркало так, чтобы все поле зрения оказалось равномерно освещено.

2. Установить показание микрометра «на ноль». Выставить «ноль» малой круглой шкалы микрометра, вращая маховик 2 микроскопа. Установка «ноля» большой шкалы производится поворотом кольца с насечкой на корпусе микрометра после установки «ноля» малой шкалы. При правильной установке микрометра «на ноль» шуп 3 должен **касаться** предметного столика микроскопа (рис. 501.6,а).

3. Положить исследуемый образец под шуп микрометра, приподняв шток микрометра 4, измерить действительную толщину образца. Измерение толщины произвести в трех различных точках. Полученные результаты занести в таблицу. На рис.501.6,б показано измерение толщины образца. Толщина образца по показаниям микрометра – 1,97 мм.

4. Положить исследуемую пластину на предметный столик микроскопа так, чтобы точка пересечения верхней и нижней рисок находилась под объективом. Вращая маховики 2 против часовой стрелки, опустить тубус так, чтобы объектив оказался от плоскости предметного столика на расстоянии 6–8 мм. (***Внимание: при настройке резкости следите за тем, чтобы объективом не раздавить исследуемый образец!***)

5. Наблюдая в окуляр, медленно поднимать тубус до тех пор, пока в поле зрения появится изображение. Найдя изображение, плавным вращением маховиков добиться наиболее рез-

кого изображения нижней риски. Следует фокусировать край риски или какую-нибудь мелкую деталь края риски на стекле. Щуп микрометра должен упираться в предметный столик микроскопа. Снять показания со шкал микрометра, записать в таблицу.

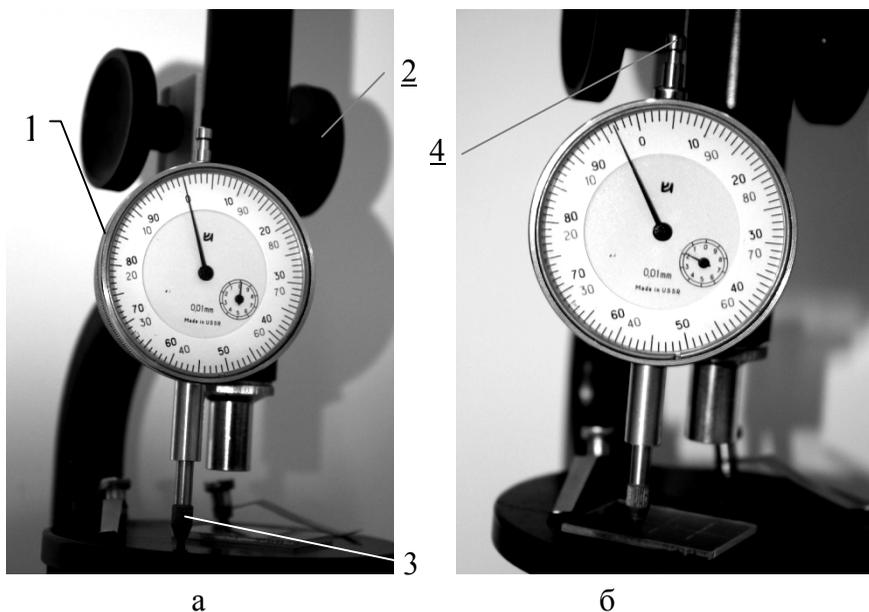


Рис. 501.6

6. **Не переворачивая** пластинку, получить четкое изображение верхней риски, плавно поднимая объектив вверх. Снять показания со шкал микрометра, записать в таблицу.

7. Выполнить пп. 5–6 в двух других точках (перекрестиях) этого же образца. Полученные результаты занести в таблицу.

8. Рассчитать среднее арифметическое значение величин  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $H$ . Рассчитать показатель преломления по формуле (501.7). Результат вычислений занести в таблицу.

9. Выполнить пп. 2–8 для других образцов.

10. Проанализировать полученные результаты измерения показателя преломления пластин, оценить погрешности измере-

ний.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое абсолютный и относительный показатели преломления?
2. Какой луч (угол) называется предельным?
3. Какое явление называется полным внутренним отражением?
4. Как вычислить показатель преломления, если бы рефрактометр измерял только минимальный угол выхода луча из призм?
5. Используя законы преломления, объясните природное оптическое явление "мираж".
6. Объясните, почему происходит преломление света.
7. Почему из-под воды небо видно только в виде сравнительно узкого круга?
8. В каких пределах можно измерять показатель преломления на изученном вами рефрактометре?

## **502. ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МИКРОСКОПА**

### **502.1. Цель работы**

Изучение интерференционного микроскопа МИИ-4. Определение толщины напыления, радиуса кривизны сферической поверхности.

### **502.2. Разделы теории**

Интерференция световых волн, когерентность.

[1. Гл. 22, §171–179]; [2. Гл. XVII, §119 – 120]; [3. Гл. 4, 4.1, 4.2].