

## Лабораторная работа №5

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ И МИКРОСКОПА

### Приборы и принадлежности:

Зрительная труба Кеплера, микроскоп, измерительный микроскоп, микрометр, штангенциркуль, масштабная линейка, мира для определения разрешающей способности, набор диафрагм.

### Введение

Любая оптическая система служит для получения увеличенного изображения удалённых и близких предметов.

Оптическая система, позволяющая получить увеличенное изображение удалённых предметов, называется телескопической. К телескопическим системам относятся трубы Кеплера и Галилея. Другой тип оптических систем – микроскопы - дают возможность получать увеличенное изображение близких предметов. Реальные оптические системы дают удовлетворительное изображение только ограниченных частей пространства и только посредством ограниченных пучков лучей. Ограничение пучков лучей в оптических системах производится с помощью оправ линз либо с помощью установленных в системе диафрагм. Значение диафрагмы столь же велико, как и значение преломляющих свойств систем. Диафрагма, ограничивающая пучок действующих лучей, называется апертурной или действующей диафрагмой. Ею определяются количество света, проходящего через систему. Её изображение в пространстве предметов называется входным зрачком оптической системы, а в пространстве изображений – выходным зрачком. Для устранения градиента освещённости на краях изображения (виньетирование) устанавливают диафрагму поля зрения (или полевую). Она задерживает световые лучи, идущие от краёв объектива. Изображение диафрагмы поля зрения, даваемое системой в пространстве

предметов, называется входным люком, в пространстве изображений – выходным люком. Для резкого ограничения поля необходимо, чтобы входной люк совпадал с плоскостью объекта.

**Микроскоп.** На рис. 1 представлен ход лучей в микроскопе. Микроскоп состоит из двух оптических систем – объектива (Об) и окуляра (Ок), разделённых значительным по сравнению с их фокусными расстояниями промежутком. Рассматриваемый предмет  $Y$  помещается перед первым фокусом объекта  $F_1$  в непосредственной близости от него.

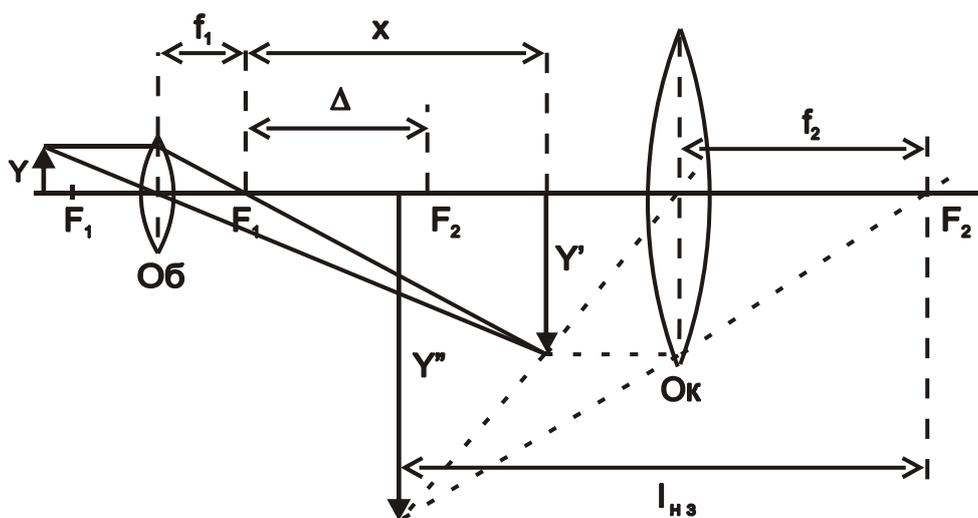


Рис. 1. Ход лучей в микроскопе

Объектив дает увеличенное обратное изображение предмета  $Y'$ , которое рассматривается через окуляр как через лупу. Следовательно, изображение  $Y''$ , полученное окуляром, располагается на расстоянии наилучшего зрения  $l_{нз}$  от глаза наблюдателя, помещенного приблизительно в заднем фокусе окуляра. Из рис. 1 следует, что увеличение, даваемое микроскопом, равно

$$\Gamma = \frac{Y''}{Y}. \quad (1)$$

Его можно выразить через характеристики микроскопа. Действительно, как следует из чертежа (рис. 1)  $Y'' = Y' \cdot \frac{l_{нз}}{f_2}$ , а  $Y' = Y \cdot \frac{x}{f_1} \approx Y \cdot \frac{\Delta}{f_1}$  (изображение

$Y'$  располагается в непосредственной близости от переднего фокуса  $F_2$  окуляра и приближенно можно считать  $X \approx \Delta$ ), поэтому

$$\Gamma = \frac{l_{из} \Delta}{f_1 f_2}. \quad (2)$$

Здесь  $f_1$  и  $f_2$  - фокусные расстояния объектива и окуляра соответственно, а  $\Delta$  - расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра, называемое длиной тубуса микроскопа. Длина тубуса практически равна расстоянию между объективом и окуляром, так как фокусные расстояния  $f_1$  и  $f_2$  для микроскопа малы по сравнению с  $\Delta$ . Как следует из выражения (2), уменьшая фокусные расстояния и увеличивая  $\Delta$ , казалось бы можно достигнуть сколь угодно больших увеличений. Однако предел увеличению, даваемому микроскопом, кладется волновой природой света.

**Зрительная труба.** На рис. 2 представлен ход лучей в зрительной трубе – трубе Кеплера.

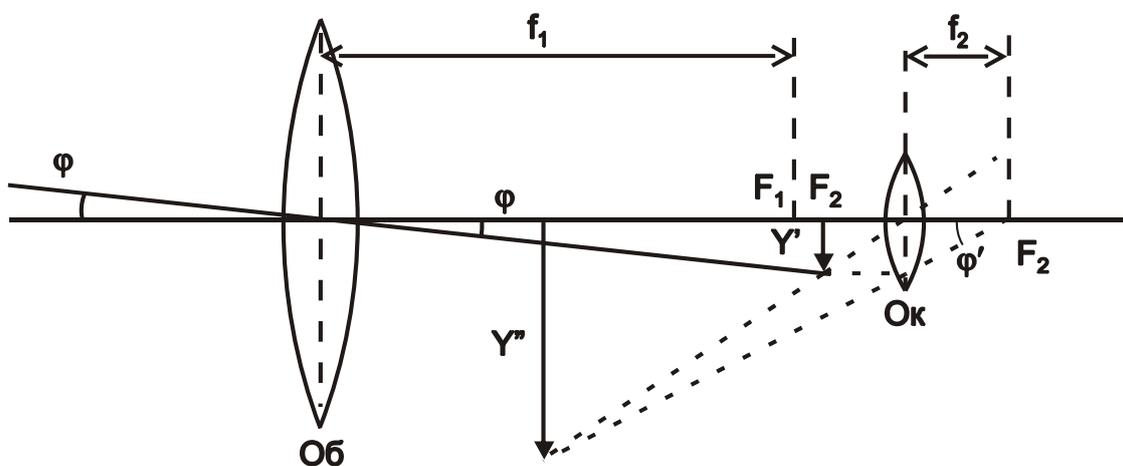


Рис. 2. Ход лучей в зрительной трубе

Объектив (Об) и окуляр (Ок) трубы располагаются так, что задний фокус объектива  $F_1$  совпадает с передним фокусом окуляра  $F_2$ . Подобные оптические системы называются телескопическими. Изображение  $Y'$  удаленного предмета, даваемое объективом, лежит практически в заднем фокусе объектива. Это

изображение рассматривается через окуляр как через лупу. Как видно из рисунка, изображение, даваемое трубой, перевернутое. Невооруженным глазом предмет будет виден под углом  $\varphi$ , тангенс которого равен  $\frac{Y'}{f_1}$ . Значит, для

увеличения (углового) даваемого зрительной трубой получается выражение

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{f_1}{f_2}, \quad (3)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  - фокусные расстояния объектива и окуляра соответственно.

Ширина параллельного пучка лучей, входящих в объектив определяется диаметром  $D_1$  его оправы (рис. 3). Следовательно, оправа объектива зрительной трубы является апертурной диафрагмой и входным зрачком трубы.

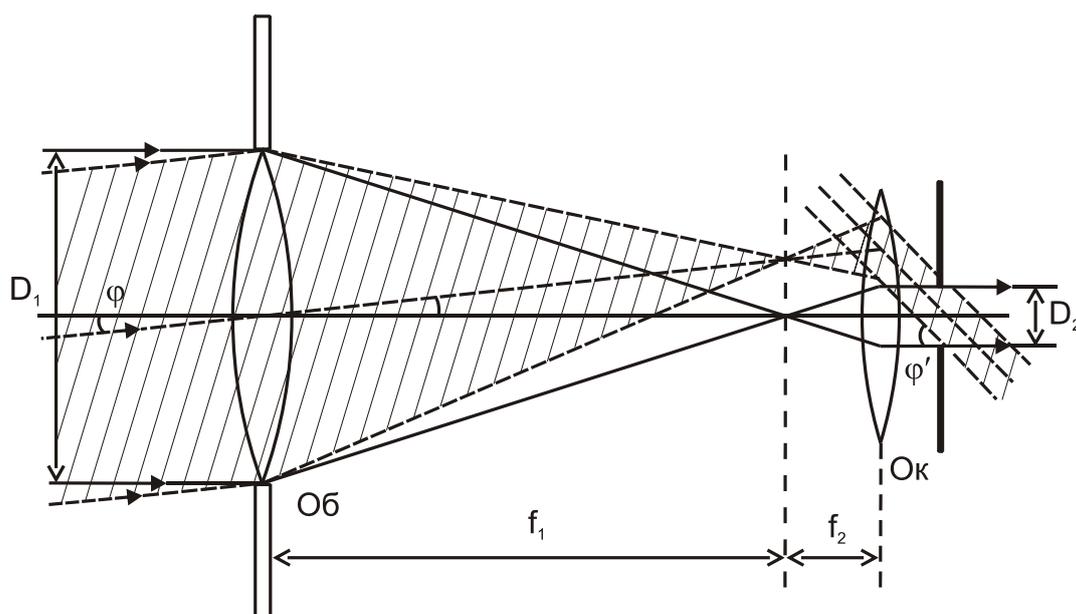


Рис. 3. Схема прохождения лучей через диафрагму объектива и окуляра

Ширина пучка, выходящего из окуляра, определяется диаметром  $D_2$  изображения оправы объектива (зрачок выхода), даваемого окуляром. На основании простых геометрических соображений, очевидных из рис. 3, следует, что:

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2}. \quad (4)$$

Таким образом, увеличение трубы можно представить еще как отношение диаметров зрачка входа  $D_1$  и зрачка выхода  $D_2$ .

Зрительные трубы характеризуются, как и любые оптические системы, разрешающей силой. Разрешающей силой называется способность оптического прибора отдельно изображать мелкие и очень близко друг от друга расположенные детали объекта. Различные приборы при одинаковом увеличении могут обладать различной разрешающей силой. Разрешающая сила оптических приборов ограничена дифракционными явлениями. Края круговой оправы объектива трубы вызывают дифракцию света. Поэтому в зрительных трубах изображения удалённых предметов, например звёзд, представляются в виде картины дифракционных колец. При наблюдении очень близких двух звёзд даваемые ими дифракционные картины частично перекрываются. По Рэлею за предел разрешения принимают такое угловое расстояние между двумя светящимися точками, при котором первое темное кольцо дифракционной картины одной точки проходит через светлый центр дифракционной картины другой точки. Радиус первого темного кольца стягивает угол  $\varphi$  (с вершиной в центре объектива). Величина этого угла определяется из условия:  $D \cdot \sin \varphi = 1.22 \cdot \lambda$ , где  $D$ -диаметр объектива,  $\lambda$  - длина световой волны. Радиус первого темного кольца  $r$  в фокальной плоскости есть  $r = f \cdot \operatorname{tg} \varphi$ , где  $f$ -фокусное расстояние объектива. При малом угле  $\varphi$   $\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi \approx \varphi$  и  $r \approx \frac{1.22 \cdot \lambda \cdot f}{D}$ . Если угловое расстояние между звездами  $\psi$ , то они будут видны отдельно при условии  $\Psi \geq \varphi$  или  $\Psi \geq \frac{1.22 \cdot \lambda}{D}$ , т.е. минимальное разрешаемое угловое расстояние равно:

$$\Psi_{\min} = \varphi = \frac{1.22 \cdot \lambda}{D}.$$

Если вместо  $\lambda$  подставить среднюю длину волны белого света, равную  $0.555 \cdot 10^{-3}$  мм, то получим предельный угол разрешения (в секундах):

$$\Psi_{\text{мин}} = \left( \frac{140}{D} \right)'' . \quad (5)$$

В формуле (5)  $D$  выражено в миллиметрах. Таким образом, предельный угол разрешения трубы зависит от диаметра её объектива. Такое значение предельного угла разрешения справедливо для идеальной оптической системы. Реальным оптическим системам присущи различные aberrации, и для них предельный угол разрешения объектива  $\Psi_{\text{мин}}$  больше, чем  $\varphi$ . Оптическая система будет выполнять своё назначение, если  $\varphi$  меньше предельного угла разрешения глаза.

В настоящей работе предлагается найти увеличение микроскопа, а также определить основные характеристики зрительной трубы: увеличение, поле зрения, предельный угол разрешения.

## **Описание установки и методика измерений**

### **Микроскоп**

Внешний вид лабораторной установки по изучению микроскопа представлен на рис. 4.

Для определения увеличения микроскопа можно воспользоваться формулой (1). Для этого нужно знать размеры  $Y$  предмета и размеры  $Y''$  его изображения, даваемого микроскопом. В качестве предмета используется медная проволока, намотанная на стеклянную пластинку (рис. 4 б). Диаметр проволоочки (размер предмета  $Y$ ) измеряется микрометром.

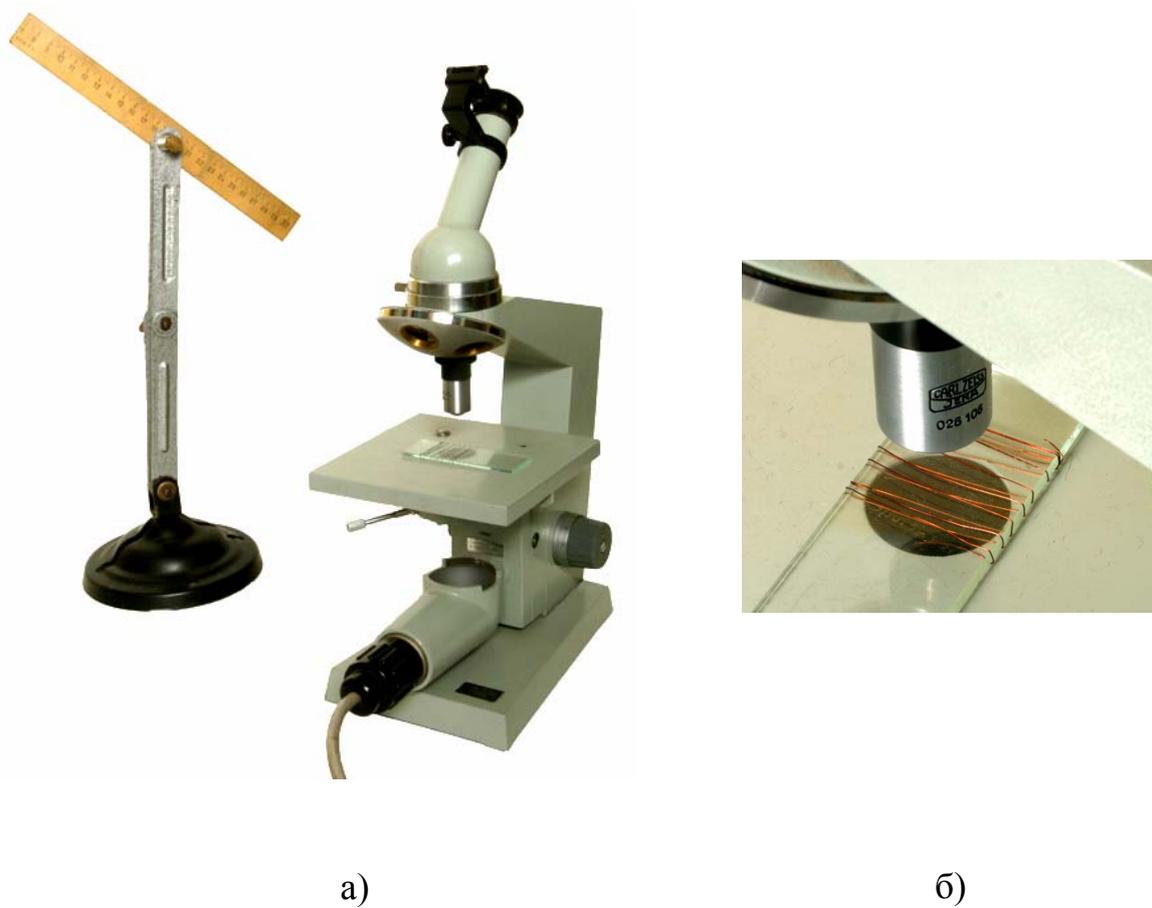


Рис. 4. Внешний вид лабораторной установки по изучению микроскопа

Для определения размера изображения (изображения диаметра проволоки  $Y''$  в микроскопе) поступают следующим образом. Пластинку с проволочкой помещают на предметный столик 1 (рис. 5) микроскопа перед его объективом 2 и освещают светом, направленным от специального осветителя 3. Наблюдая в окуляр 4 микроскопа, фокусируют проволочку в поле зрения окуляра вращением барабана 5 (грубо) и барабана 6 (точно). На расстоянии наилучшего зрения помещена измерительная линейка 7. Совмещая изображение проволоочки, видимое одним глазом через окуляр микроскопа, вращением винтов 8 и 9 предметного столика с делениями измерительной линейки, видимыми другим глазом, можно определить размеры изображения диаметра проволоочки  $Y''$  и по формуле (1) определить увеличение микроскопа.

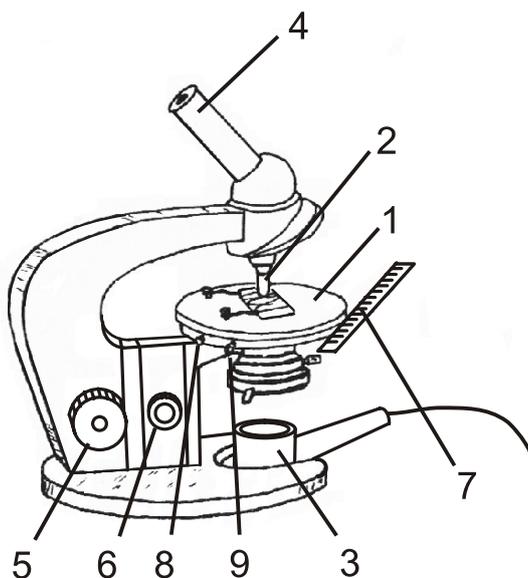


Рис. 5. Схема микроскопа

### Зрительная труба

Внешний вид зрительной трубы представлен на рис. 6.



Рис. 6

Установка для определения увеличения зрительной трубы представлена на рис. 7. Зрительная труба 1 укрепленная на подставке 2, может быть наведена на любой удаленный предмет. Вращением барабана 3 окуляра фокусируется

рассматриваемый предмет. Для измерения выходного зрачка трубы она снабжена измерительным окуляром 4 в оправе 5 укрепляемой на зрительной трубе. В поле зрения измерительного окуляра имеется сетка с ценой деления 0,176 мм. Нужные размеры входного зрачка устанавливаются выбором сменных диафрагм 6: 10мм, 20 мм, 30 мм, 40 м, 50 мм. На расстоянии  $R=8$  м помещена измерительная линейка 7 для определения увеличения зрительной трубы и мира для оценки предельного угла расширения.

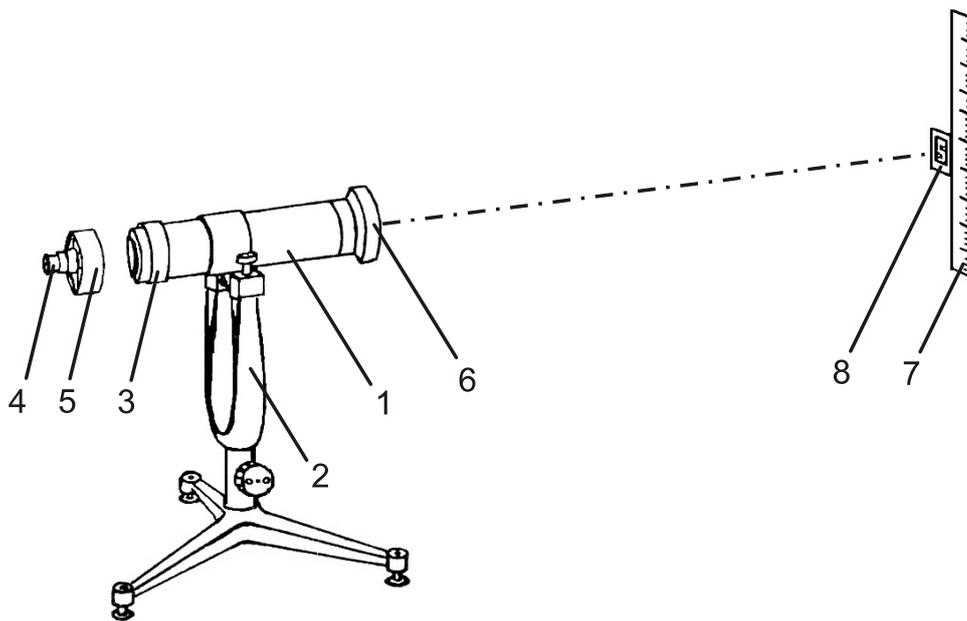


Рис. 7. Схема установки для определения увеличения зрительной трубы

Для определения увеличения трубы фокусируют в её поле зрения измерительную линейку и рассматривают её одним глазом непосредственно, а другим через трубу. Находят такое положение трубы, при котором изображение накладывается на видимую невооруженным глазом линейку. Определяют число  $n$  целых делений линейки, совпадающих с  $N$  целыми делениями изображения. Тогда увеличение будет равно:

$$\Gamma = \frac{n}{N}. \quad (6)$$

Угол поля зрения трубы можно найти следующим образом. Отсчитывают число  $m$  деления линейки, видимых в зрительную трубу. Если делений линейки не хватает, то определяют число  $m_0$ , видимых в зрительную трубу до середины поля зрения. Тогда  $m = 2m_0$  и угол поля зрения будет равен:

$$\gamma = 57.3^\circ \frac{m}{R}, \quad (7)$$

где  $R$  – расстояние от объектива зрительной трубы до измерительной линейки.

Для оценки предельного угла разрешения фокусируют зрительную трубу на миру. Мира состоит из одинаковых квадратиков, каждый из которых заштрихован штрихами разной толщины. В табл. 1 указана толщина штриха каждого квадратика.

Таблица 1.

N n/n	1	2	3	4	5	6	7	8
b(мм)	0.16	0.22	0.25	0.34	0.44	0.49	0.55	0.62

N n/n	9	10	11	12	13	14	15	16
b(мм)	0.66	0.73	0.80	0.86	0.93	0.99	1.07	1.13

Последовательно переводя глаз от одного квадрата миры, видимой в зрительной трубе, к другому, находят тот квадрат, в котором ещё видны штрихи всех направлений. Номер квадрата позволяет по табл.1 определить толщину штриха и вычислить предельный угол разрешения зрительной трубы по формуле:

$$\Psi_{\min} = 57,3 \frac{2b}{R}, \quad (8)$$

здесь,  $R$ - расстояние от объектива зрительной трубы до миры выраженное в миллиметрах.



табл. 3 и оценить погрешность значения  $\Gamma$  для этого способа. Сравнить результаты определения увеличения трубы обоими способами.

Таблица 3

$N$ n/n	$N$	$n$	$D_2$	$\Gamma$
Среднее				

б) Определение угла поля зрения.

Для этого 5-10 раз сосчитать число всех делений  $m$  шкалы, видимых в поле зрения трубы, и по формуле (7) вычислить угол поля зрения. Результаты занести в табл. 4 и оценить погрешность в определении угла поля зрения.

Таблица 4

№	m	$\gamma$	$D_1 =$		$D_1 =$		$D_1 =$	
			$b$	$\psi$	$b$	$\psi$	$b$	$\psi$
Среднее								

в) Определение предельного угла разрешения.

Для различных значений входного зрачка  $D_1$  определить 5-10 раз значение  $b$  вышеописанным способом, и по формуле (8) вычислить для каждого  $b$  предельный угол разрешения. Результаты измерений занести в табл. 4 и

оценить погрешность в определении предельного угла разрешения  $\psi_{\min}$ . Сравнить полученные результаты с углом разрешения, определенным по формуле (5).

### Литература

1. С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. Курс общей физики // СПб.: Издательство "Лань", 2006, т.3, §§ 269, 314, 316-325, 330.
2. Д.В. Сивухин. Общий курс физики // М.: Физматлит, Издательство МФТИ, 2002, т.4, §§ 9-17, 24, 56.