

метрии, гравиметрии, спектроскопии, фотометрии, гониометрии, микроскопии и т. д. Данные об окулярах некоторых зрительных труб приведены в табл. III в приложении.

§ 55. ЛУПА И МИКРОСКОП

Оптическая система, предназначенная для наблюдения близко расположенных предметов в увеличенном виде, называется *микроскопом*. Простейшим микроскопом является *лупа*. Каждая лупа характеризуется: 1) видимым увеличением $\bar{\Gamma}$, 2) полем зрения $2l$.

Схема действия лупы показана на рис. 90. Предмет $2l$ размещается в переднем фокусе лупы. Зрачок глаза D_r наблюдателя размещается в выходном зрачке лупы. Наблюдатель видит изображение под углом ω' , но не на бесконечности, а на расстоянии наилучшего зрения — 250 мм, что объясняется психологией восприятия.

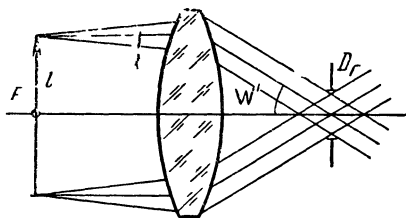


Рис. 90. Лупа

Под видимым увеличением лупы понимают отношение видимого размера изображения к видимому размеру предмета. А так как $l' = 250 \text{ tg} \omega'$, а $l = f \text{ tg} \omega$, то

$$\bar{\Gamma} = \frac{250}{f} \cdot \quad (55,1)$$

Величину $\bar{\Gamma}$ принято называть окулярным увеличением.

Поле зрения лупы ограничивается aberrациями и ее диаметром.

Из практики применения луп можно указать эмпирическую зависимость между полем зрения и видимым увеличением (в миллиметрах):

$$2l = \frac{150}{\bar{\Gamma}} \cdot \quad (55,2)$$

Световой диаметр лупы $D_{св}$ определяется размером поля зрения. Как следует из рис. 90:

$$D_{св} = 2l + D_r \cdot \quad (55,3)$$

Плоско-выпуклая линза, обращенная плоской стороной к глазу, может служить лупой с увеличением не свыше 4^x . Такая лупа часто применяется для отсчета по шкалам. Лупы 6^x , 10^x и 12^x обычно состоят из трех склеенных линз. Такая лупа называется *апланатической*. Конструктивные данные апланатической лупы 6^x приведены ниже:

- $r_1 = 32,7 \text{ мм}$
 $r_2 = 16,35 \text{ мм}$
 $r_3 = -16,35 \text{ мм}$
 $r_4 = -32,7 \text{ мм}$
- $d_1 = 2,5 \text{ мм},$ Ф1 Полный $\varnothing 25 \text{ мм}$
 $d_2 = 11 \text{ мм},$ К8
 $d_3 = 2,5 \text{ мм},$ Ф1 Световой $\varnothing 23 \text{ мм}$

Лупы $20\times$ изготавливаются из четырех стекол, склеенных между собой. Они применяются редко из-за малого поля зрения и малого расстояния между предметом и лупой. Для увеличения свыше $12\times$ применяют микроскоп.

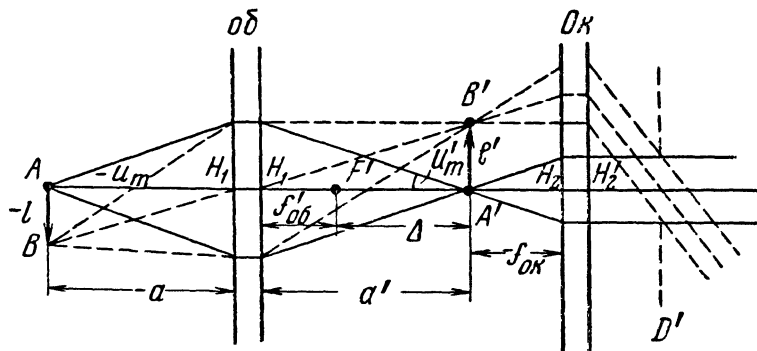


Рис. 91. Оптическая схема тубуса микроскопа

Микроскоп является сложной оптической системой, состоящей, как минимум, из объектива и окуляра. Объектив (рис. 91) проектирует изображение в переднюю фокальную плоскость окуляра. В этой плоскости создается промежуточное действительное обратное изображение рассматриваемого предмета, позволяющее совместить с ним какую-либо шкалу или сетку. Шкала (сетка) видна одновременно с рассматриваемым предметом (отсчетный, шкаловой, измерительный микроскопы). При создании микроскопов выходящие пучки лучей из окуляра микроскопа рассматривают как параллельные.

Существует общераспространенное мнение, что изображение располагается на расстоянии 250 мм от наблюдателя, для чего теоретически передний фокус окуляра не должен совпадать с плоскостью изображения, образованного объективом. Действительно, при наблюдении в микроскоп изображение кажется расположенным впереди на расстоянии $250\text{—}300 \text{ мм}$, однако это впечатление относится к области психологии восприятия, так как опыт показывает, что наводке в микроскоп на наилучшую резкость изображения соответствует аккомодация для нормального глаза в ноль диоптрий, что в свою очередь означает получение после окуляра параллельных пучков лучей.

Если отдельно выполнить наводку на резкость в микроскоп и в зрительную трубу на бесконечно удаленные предметы и представить затем последнюю объективом к окуляру микроскопа, то увидим резкие изображения, и они снова будут казаться как бы находящимися перед наблюдателем. Поэтому при создании оптических приборов типа микроскопа (стереометры, компараторы и т. п.) плоскость изображения после всей предшествующей окуляру оптической системы совмещают с передней фокальной плоскостью окуляра.

Зрачок входа на рис. 91 совпадает с объективом. В действительности в микроскопах зрачок входа может быть и перед объективом и позади его.

Микроскоп характеризуется: 1) видимым увеличением Γ , 2) полем зрения $2l$, 3) апертурой A .

Объектив с линейным увеличением β образует действительное изображение величиной $2l'$. Это изображение рассматривается при помощи окуляра, работающего подобно лупе, с определенным увеличением. Следовательно, видимое увеличение микроскопа равняется произведению видимого увеличения окуляра на линейное увеличение объектива

$$\Gamma = \beta \bar{\Gamma}. \quad (55,3)$$

Подставляя в это уравнение выражение (55,1), получим

$$\Gamma = \frac{250\beta}{f'_{ок}}. \quad (55,4)$$

Рассматривая микроскоп в целом как лупу, найдем фокусное расстояние микроскопа по формуле (55,1)

$$f'_m = \frac{250}{\Gamma}. \quad (55,5)$$

а отсюда следует, что

$$f'_m = \frac{f'_{ок}}{\beta}. \quad (55,6)$$

Поле зрения микроскопа, как и в случае зрительной трубы, ограничивается полем зрения окуляра. Величина изображения

$$l' = f'_{ок} \operatorname{tg} \omega',$$

где ω' — наиболее допустимый угол в пространстве изображений, но $l' = \beta l$. Тогда, приравнявая и заменяя отношение $f'_{ок}/\beta$ по уравнению (55,4), получим

$$2l = \frac{500 \operatorname{tg} \omega'}{\Gamma}. \quad (55,7)$$

Апертура характеризует светосилу микроскопа и его разрешающую способность. Под *числовой апертурой* понимают произведение показателя преломления среды, в которой помещен предмет, на синус апертурного угла

$$A = n_1 \sin u_m. \quad (55,8)$$

Из рисунка 91 можно установить зависимость между апертурой, диаметром выходного зрачка и видимым увеличением. Положим $n_1=1$ и $u_m=A$. Согласно уравнениям (15,1) и (15,2) между углами u_m и u'_m имеется зависимость через линейное увеличение объектива, а радиус выходного зрачка равен произведению фокусного расстояния окуляра на апертурный угол в пространстве между объективом и окуляром, т. е.

$$u_m = \beta u'_m, \quad D' = 2u'_m f_{\text{он}}.$$

Решив эти уравнения и заменив $\beta/f'_{\text{он}}$ из уравнения (55,4), получим

$$D' = \frac{500A}{\Gamma}. \quad (55,9)$$

Оптическая среда, которая заполняет пространство между наблюдаемым предметом и объективом, называется *иммерсией*. В качестве иммерсии применяют воду, глицерин, можжевеловое масло или монобромнафталин.

Предмет устанавливается на предметное стекло микроскопа (рис. 92, а) и сверху закрывается покровным стеклом. Рассматриваемый предмет плавает в жидкости, а пространство между покровным стеклом и фронтальной линзой объектива микрообъектива также заполнено жидкой средой с показателем преломления, близким к показателю стекла.

В этом случае лучи при выходе из покровного стекла не претерпевают полного внутреннего отражения, а проходят в объектив (рис. 92, б). В формуле апертуры (55,8) n_1 и есть показатель преломления иммерсии

Дифракционная теория образования изображения в микроскопе позволяет указать пределы разрешения

Рис 92 Роль иммерсии в микроскопе 1 — предметное стекло, 2 — покровное стекло, 3 — иммерсия, 4 — фронтальная линза микрообъектива

предметов, расположенных на конечном расстоянии от оптической системы. Л. И. Мандельштам показал, что в большинстве случаев условия разрешения разрешения самосветящихся предметов аналогичны равномерно освещенным*.

* См Г. С Ландсберг. Оптика М—Л, Гостехиздат, 1947, стр 200.

Наименьший предмет или деталь объекта, разрешаемые в микроскопе, определяются уравнением

$$\delta = \frac{\lambda}{2A}. \quad (55,10)$$

Разрешающая способность оптической системы типа микроскопа пропорциональна апертуре A .

Апертура микроскопа позволяет определить ожидаемую разрешающую способность по формуле (55,10). Наибольшая достигнутая величина апертуры составляет $A=1,6$, что при наблюдении в видимых лучах спектра ($\lambda=0,55$ мкм) позволяет получить предельно маленькое расстояние между двумя рассматриваемыми точками в 0,17 мкм. Чтобы раздельно рассмотреть такие точки, необходимо обеспечить соответствующее видимое увеличение микроскопа, называемое *полезным*. Оно учитывает разрешающую силу глаза от $2'$ до $4'$ и определяется выражением

$$500A < \Gamma_n < 1000A. \quad (55,11)$$

Таким образом, разумный предел наибольшего увеличения микроскопа при $A=1,6$ составляет $1600\times$. В практике большей частью создают микроскопы, позволяющие получать увеличение до $1350\times$. В особых случаях оно достигает $3500\times$.

Для измерительных микроскопов принимают разрешающую силу глаза в 60 сек. Тогда формула, полезного увеличения принимает вид

$$\Gamma_n = 270A. \quad (55,12)$$

Длина микроскопа L главным образом зависит от фокусного расстояния объектива:

$$L = a' + f'_{ок}. \quad (55,13)$$

Величины a и a' связаны уравнением линейного увеличения, а с фокусным расстоянием объектива — через уравнение отрезков (44,9). Большое фокусное расстояние объектива приводит к громоздким конструкциям, а малое — к трудностям достижения удовлетворительной абберационной коррекции для сравнительно большого поля зрения.

Опыт многих лет показал, что так называемая механическая длина тубуса микроскопа должна быть в пределах от 160 до 190 мм. *Механической длиной тубуса* называется расстояние между опорными плоскостями: с одной стороны (снизу), оправой объектива, а с другой стороны (сверху), оправой окуляра. Стандартизация этого размера в отечественных микроскопах в 160 мм позволяет широко применять взаимную замену объективов и окуляров одних другими, учитывая также взаимозаменяемость резьб оправ объективов и диаметров окуляров, обычно вкладываемых в тубус микроскопа.

Микроскоп имеет сложную оптическую систему, разделяющуюся как бы на две части — осветительную и наблюдательную. Обычно под собственно микроскопом понимают наблюдательную систему, состоящую из объектива и окуляра, и оптические характеристики микроскопа относятся именно к этой части микроскопа.

Конструкции осветительных устройств, предназначенных для освещения прозрачных и непрозрачных предметов, различны. Оптическая схема микроскопа, состоящая из тонких компонентов, применяемая при рассмотрении прозрачных предметов, показана на рис. 93.

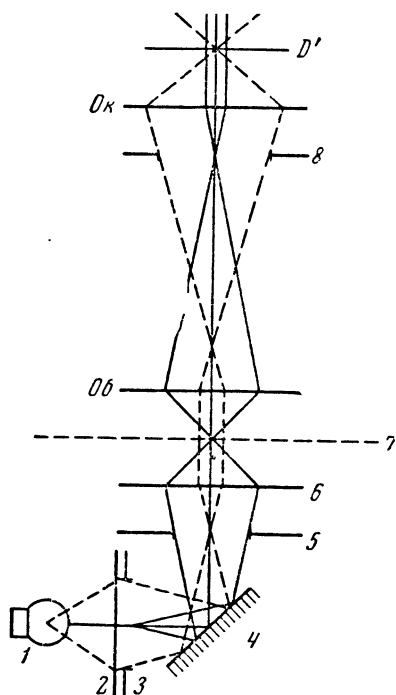


Рис. 93. Оптическая схема микроскопа: 1 — источник света; 2 — конденсор I; 3 — диафрагма I; 4 — зеркало; 5 — диафрагма II; 6 — конденсор II; 7 — плоскость предметов; 8 — диафрагма поля зрения

Оптика микроскопа состоит из источника света, конденсора I, зеркала, конденсора II, объектива и окуляра. Следует иметь в виду, что источник света, конденсор I и ирисовая диафрагма I конструктивно отделены от микроскопа и представляют собой как бы самостоятельный прибор, называемый осветителем, подсоединяемый к микроскопу при наблюдении. Показанная на рис. 93 схема освещения предмета является наилучшей и называется *системой Келера*. Источник света проектируется конденсором I в плоскость диафрагмы II, которая расположена в точке переднего фокуса конденсора II. Сзади конденсора I находится ирисовая диафрагма I. Эта диафрагма проектируется конденсором II в плоскость рассматриваемых предметов. Одновременно конденсор II проецирует отверстие ирисовой диафрагмы II в бесконечность. При таком способе освещения поле зрения микроскопа равномерно освещено, а вредный рассеянный свет может быть срезан ограничением отверстия диафрагмы I. Изменением же отверстия в диафрагме II можно влиять на размер апертурного угла микрообъектива, что также помогает устранить лишний рассеянный свет.

Зеркало с внутренним серебрением имеет две стороны, на одной из них — плоская отражающая поверхность, а на другой — вогнутая. Вогнутое зеркало применяется в микроскопах слабого увеличения без конденсора, а плоское — вместе с конденсором. Эти конденсоры, расположенные под предметным столиком микроскопа,

применяются в микроскопах сильного увеличения, с апертурой более 0,65, и бывают неахроматические и ахроматические (рис. 94).

Для освещения непрозрачных предметов служат opak-иллюминаторы различных систем. Они направляют свет сверху на рассматриваемый предмет. Например, свет направляется от лампочки, размещенной сбоку тубуса, на стеклянную пластинку, установленную между объективом и окуляром, под углом 45° к оптической оси микроскопа (система Бека). Часть света отражается от поверхности пластинки и проходит через объектив.

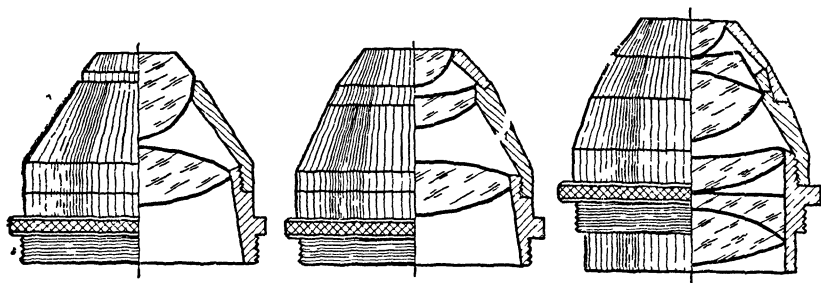


Рис. 94. Конденсоры микроскопа

В ряде микроскопов в последнее время стали применяться двухобъективные системы (рис. 95) с параллельным ходом лучей между ними. В этом случае рассматриваемый предмет размещается в передней фокальной плоскости объектива, а его изображение

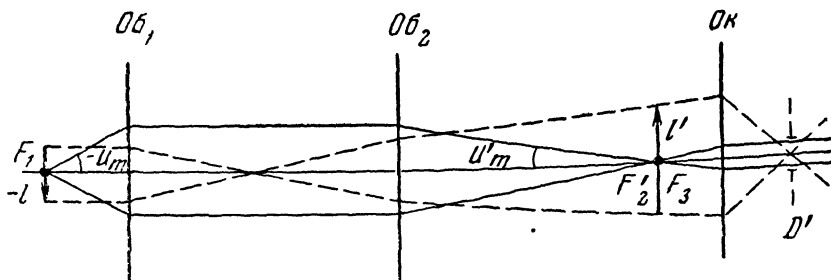


Рис. 95. Двухобъективная система тубуса микроскопа

после второго объектива получается в задней фокальной плоскости второго объектива, совмещенной с передней фокальной плоскостью окуляра. Здесь длина механического тубуса имеет второстепенное значение, а параллельный ход лучей между объективами позволяет легко осуществить ввод пучков лучей от осветителя для освещения непрозрачных предметов (рис. 96).

Объективы микроскопа с увеличением до $\beta = -6$ обычно состоят из двух склеенных линз. Апертура таких объективов не свы-

ше 0,15. Объектив микроскопа в виде двух двухлинзовых склеенных объективов применяется в случае увеличения объектива от 6 до 10. Объективы обозначаются через произведение числа линейного увеличения на апертуру, например $6 \times 0,17$; $8 \times 0,20$; $10 \times 0,25$.

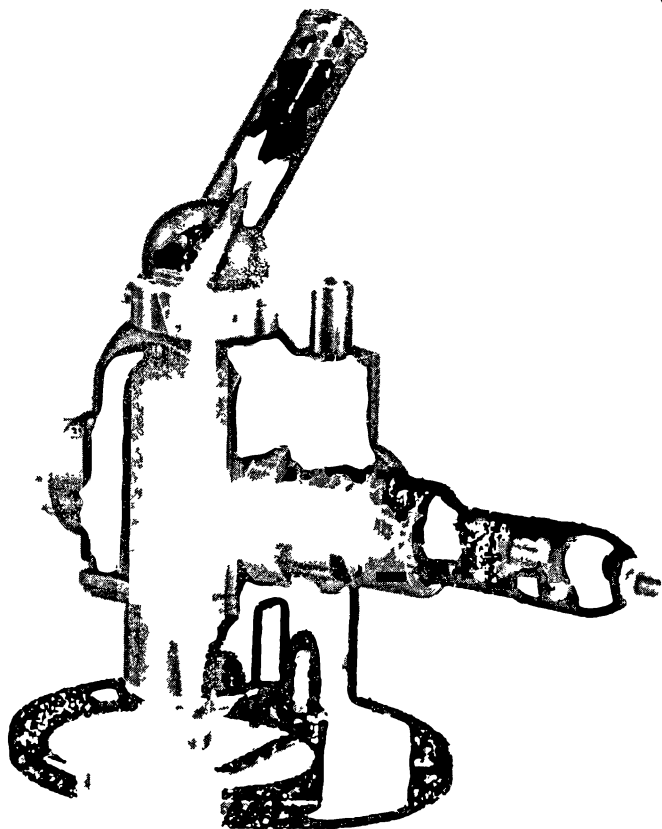


Рис 96 Микроскоп для наблюдения непрозрачных предметов

Достигнуть большего увеличения при хорошем качестве изображения удастся только за счет усложнения конструкции. Конструкции современных микрообъективов показаны на рис. 97

В качестве окуляров микроскопа наиболее часто применяют окуляры типа Гюйгенса (см. рис 82). В отдельных случаях применяют так называемые компенсационные окуляры типа Кельнера, которые частично компенсируют хроматизм увеличения объектива.

Микроскопы обычно снабжаются сменными объективами и окулярами. Например, биологический микроскоп имеет объективы $8\times$, $40\times$ и $90\times$ и окуляры $7\times$, $10\times$ и $15\times$. Такой микроскоп позволяет получать различные увеличения от $56\times$ до $1350\times$. Вид микроскопа в разрезе показан на рис. 98.

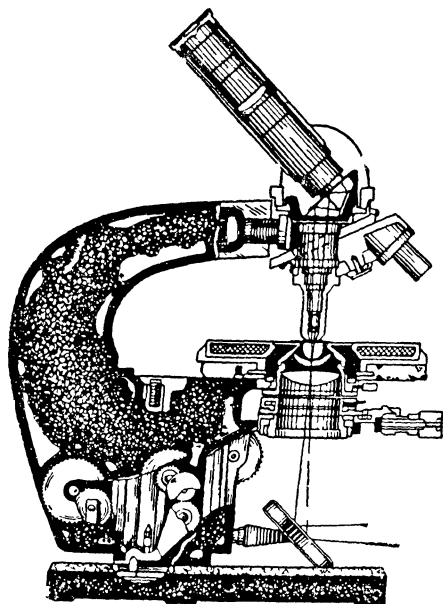
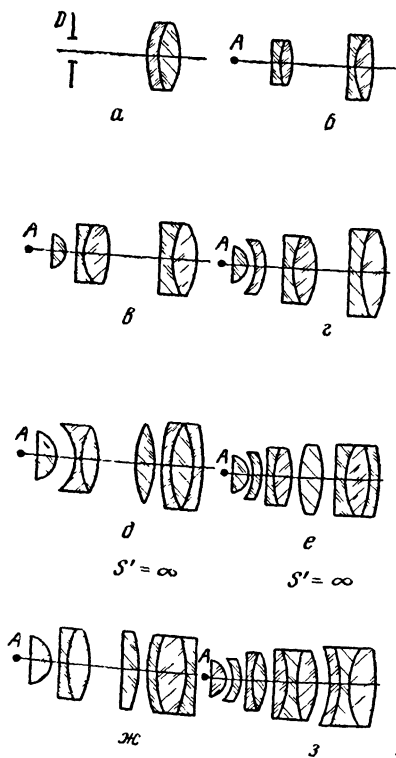


Рис 98 Биологический микроскоп

Рис. 97 Микрообъективы: *a* — от $1\times 0,0016$ до $6\times 0,18$, *б* — от $7\times 0,17$ до $10\times 0,25$; *в* — от $10\times 0,3$ до $70\times 0,8$, *г* — от $20\times 0,7$ до $40\times 0,75$, $95\times 1,25$; *д* — $20\times 0,65$ (апохромат); *е* — $90\times 1,35$; *ж* — $30\times 0,65$, *з* — $90\times 1,3$

тивов и окуляров микроскопов приведены в табл. IV и V в приложении.

К оптической системе микроскопа относятся не только собственно микроскопы, биологические, отсчетные, поляризационные и т. п. К таким системам относятся вообще все визуальные оптические приборы, предназначенные для рассмотрения близко расположенных предметов — компараторы, стереометры и т. п. Данные для некоторых микрообъек-

§ 56. ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТИВ

Фотографическим объективом называется оптическая система, образующая действительное изображение, фиксируемое каким-либо светочувствительным слоем. Развитие фотохимии обусловило появление оптических систем, предназначенных для фотографиче-