

1.6. СВЕТОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Цель лекции: *изучение основных методов световой микроскопии.*

1.6.1. ОСНОВЫ МИКРОСКОПИИ

Результаты изготовления элементов приборостроения подвергаются различным видам контроля. Одним из широко распространенных методов контроля является оптический контроль. Оптический контроль использует оптические приборы, в которых применяются лучи видимого **света**, так как и глаз работает в оптическом диапазоне длин волн. Соответственно оптические микроскопы не могли иметь **разрешения** менее полупериода волны опорного излучения (для видимого диапазона длина волн 0,4–0,7 мкм, или 400–700 нм) с возможным максимальным увеличением в районе 2000 раз.

Идея просвечивающего **электронного микроскопа** состояла в замене опорного электромагнитного излучения на электронный пучок. Известно, что для увеличения разрешения микроскопов, использующих электромагнитное излучение, необходимо уменьшение длины волны электромагнитного излучения от ультрафиолетового диапазона вплоть до рентгеновского (длина волны сопоставима с межатомными расстояниями в веществе) и основная трудность состоит в фокусировке ультрафиолетовых и, тем более, рентгеновских лучей. Последние вообще не поддаются фокусировке.

Особенность взаимодействия рентгеновских лучей с веществом отличает рентгеновские оптические системы от **оптических систем** для **световых** и электронных лучей. Малое отклонение показателя преломления рентгеновских лучей от единицы (меньше чем на 10^{-4}) практически не позволяет использовать для их фокусировки **линзы** и **призмы**. Электрические и магнитные линзы для этой цели также неприменимы, так как рентгеновские лучи инертны к электрическому и магнитному полям. Поэтому в рентгеновской микроскопии для фокусировки рентгеновских лучей используют явление их полного внешнего отражения изогнутыми зеркальными плоскостями или отражение от кристаллографических изогнутых плоскостей. На этом принципе построены отражательные рентгеновские микроскопы.

1.6.2. УСТРОЙСТВО ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА И СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ

Методы исследования биологических объектов при помощи микроскопов имеют очень давнюю историю и позволили за это время получить ряд фундаментальных, важнейших результатов. Несмотря на то, что оптическая микроскопия насчитывает более 300 лет, она не утратила свои позиции, а введение новых методов и техники исследований (флюоресцентная микроскопия, конфокальная микроскопия, микроскопия ближнего поля) определяет ее приоритетное значение в настоящее время. Микроскоп вошел в практику научных

исследований с того момента, как были подмечены увеличительные свойства воды. И хотя увеличительные стекла и другие виды простейших микроскопов все еще применяются и в настоящее время, область микроскопии столь велика, что первые исследователи вряд ли могли себе такое представить. Первые наблюдения микроорганизмов были сделаны А. Левенгуком еще в 1673 г. За три столетия микроскоп, конечно, существенно преобразился, но его суть как прибора для получения увеличенных изображений объектов, невидимых невооруженным глазом, осталась неизменной. Микроскоп и сейчас является главным инструментом исследователя-морфолога и врача-лаборанта. Несмотря на значительные успехи, полученные другими методами исследования клеток, для анализа живых одиночных клеток наиболее перспективна оптическая микроскопия. С этим связан буквально бум, который происходит в последние годы в появлении принципиально новых схем и методов оптической микроскопии. Можно сказать, что развитие биологических наук в некоторой степени зависит от создания нового класса микроскопов и техники, однако наиболее популярным на сегодняшний день является микроскоп, имеющий такую же оптическую конструкцию, как и микроскопы, которые создавались в первой половине XX столетия.

Эти микроскопы все еще широко применяются, так как они сравнительно недороги, просты в использовании и надежны для повседневных, рутинных исследований, составляющих основу любой научной работы. В настоящем разделе мы, наряду с изложением традиционных вопросов микроскопии, постарались осветить современные разработки в данной области, которые уже нашли применение при исследовании прижизненной цитологии клетки. Сделана также попытка, с одной стороны, указать на те перспективные направления в микроскопии, которые представляют наибольший интерес для медицины и, с другой стороны, на возможность удовлетворения этого интереса современными методами оптоэлектроники и компьютерного анализа оптической информации.

1.6.3. ГЛАЗ И ЕГО СВОЙСТВА

Схематически устройство глаза представлено на рис. 1.58. Передняя часть глаза ограничена снаружи прозрачной твердой оболочкой, известной под названием роговицы. За роговицей располагается передняя глазная камера, ограниченная сзади хрусталиком, непосредственно перед которым расположена непрозрачная оболочка – радужная оболочка с отверстием, диаметр которого может изменяться в зависимости от количества световой энергии, поступающей в глаз.

Передняя глазная камера заполнена водянистой жидкостью с показателем преломления, близким к показателю преломления воды. Хрусталик, состоящий из прозрачного слоистого хрящевидного вещества, может под воздействием окружающей его мышцы сжиматься, изменяя свою оптическую силу. Показатель преломления хрусталика несколько больше, чем показатель преломления

водянистой жидкости и стекловидного тела, расположенного позади хрусталика. Камера глаза, заполненная стекловидным телом, ограничена сзади светочувствительной оболочкой, называемой ретиной, или сетчаткой. Сетчатка выстлана множеством светочувствительных клеток – палочек и колбочек, – способных реагировать на световое раздражение. Число палочек составляет около $13 \cdot 10^7$; число колбочек – около $7 \cdot 10^6$. Палочки более светочувствительны, но не обладают способностью реагировать на цвета.



Рис. 1.58. Устройство глаза

Большая часть колбочек сосредоточена на участке диаметром около 1 мм; диаметр самих колбочек около 0,005 мм. Участок, заполненный колбочками, носит название желтого пятна, на котором глаз обладает наибольшей разрешающей способностью – возможностью цветового восприятия. В зоне выхода глазного нерва из глазного яблока располагается слепое пятно, неспособное к восприятию изображения.

Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке для ненапряженного глаза, называют дальней точкой; равным образом такое же положение предмета при наибольшем возможном напряжении глаза называют ближней точкой глаза. Разность обратных величин этих расстояний называют диапазоном аккомодации глаза.

Если передняя или дальняя точка глаза бесконечно удалена, то такой глаз называют нормальным или эмметропическим глазом; несовпадение дальней точки с бесконечно удаленной называют аметропией глаза. Если дальняя точка располагается перед глазом, то такой глаз называют миопическим, или близоруким; если же дальняя точка будет расположена позади глаза, то глаз называют гиперметропическим, или дальнозорким.

Используя статистический материал, А. Гульстранд приводит данные для усредненного эметропического глаза. Положение дальней точки и диапазон аккомодации меняются с возрастом человека. Эти изменения приведены в табл. 1.15. Состояние глаза после 50–60 лет называют старческой дальнозоркостью, или пресбиопией.

Таблица 1.15

Изменение диапазона аккомодации

Возраст, годы	Положение точки		Аккомодация	Возраст, годы	Положение точки		Аккомодация
	ближней	дальней			ближней	дальней	
	Дптр				Дптр		
10	-14	0	14	50	-2,5	0	2,5
15	-12	0	12	55	-1,5	0,25	1,75
20	-10	0	10	60	-0,5	0,50	1,00
25	-8,5	0	8,5	65	-0,25	0,75	0,50
30	-7,0	0	7,0	70	-1,00	1,25	0,25
35	-5,5	0	5,5	75	-1,75	1,75	0
40	-4,5	0	4,5	80	+2,50	2,50	0
45	-3,5	0	3,5				

Значение светового раздражения, при котором зрительное восприятие становится возможным, называют абсолютным порогом зрительного ощущения. Величина, обратная абсолютному порогу, определяет абсолютную световую чувствительность глаза.

Разрешающая способность глаза характеризуется углом, при котором глаз еще раздельно наблюдает две светящиеся точки. Угол определяется отношением диаметра светочувствительного элемента – колбочки – к переднему фокусному расстоянию глаза и составляет около $1'$, что близко к дифракционной разрешающей способности для зрачка диаметром около 2 мм.

В некоторых, особо благоприятных условиях разрешающая способность глаза заметно повышается; так, глаз способен обнаружить смещение двух участков линии, наблюдаемых под углом около $10''$. Этот угол называют нониальной остротой зрения; явление нониальной остроты зрения объясняется тем, что смещение изображений двух участков линии попадает на различно расположенные клетки сетчатки, как это показано на рис. 1.59.

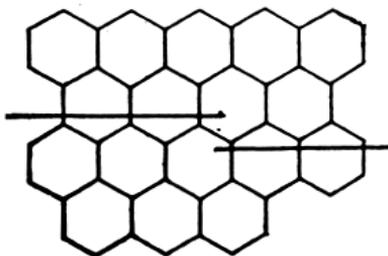


Рис. 1.59. Расположение клеток сетчатки

Микроскоп (рис. 1.60) имеет оптическую схему с двумя ступенями увеличения: первая осуществляется объективом, а вторая – окуляром. Фокусное расстояние микроскопа:

$$f' = -\frac{f'_{об}f'_{ок}}{\Delta}, \quad (1.1)$$

где: $f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива; $f'_{ок}$ – фокусное расстояние окуляра; Δ – расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра, которое называется оптической длиной тубуса. Видимое увеличение микроскопа:

$$\bar{\Gamma} = \frac{D}{f'} = \frac{250}{f'}; \quad (1.2)$$

где: D – механическая длина тубуса микроскопа; f' – фокусное расстояние микроскопа.

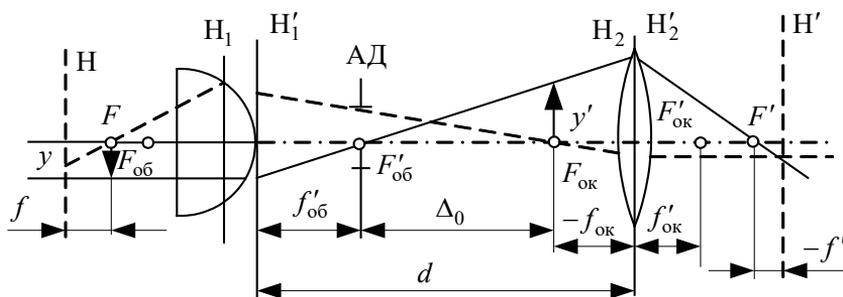


Рис. 1.60. Оптическая схема микроскопа

Примечание. На рис. 1.57 H, H_1, H_1', H_2, H_2' – гиперфокальные расстояния.

Величина Δ для каждого объектива в зависимости от его фокусного расстояния различна и лежит в пределах 150–200 мм. Чтобы выдержать эту величину, положение объективов при их установке на приборе фиксируется нижним срезом тубуса микроскопа. Оправа окуляра опирается на верхний срез тубуса. Расстояние от нижнего до верхнего среза тубуса называется механической длиной тубуса, как показано на рис. 1.61.

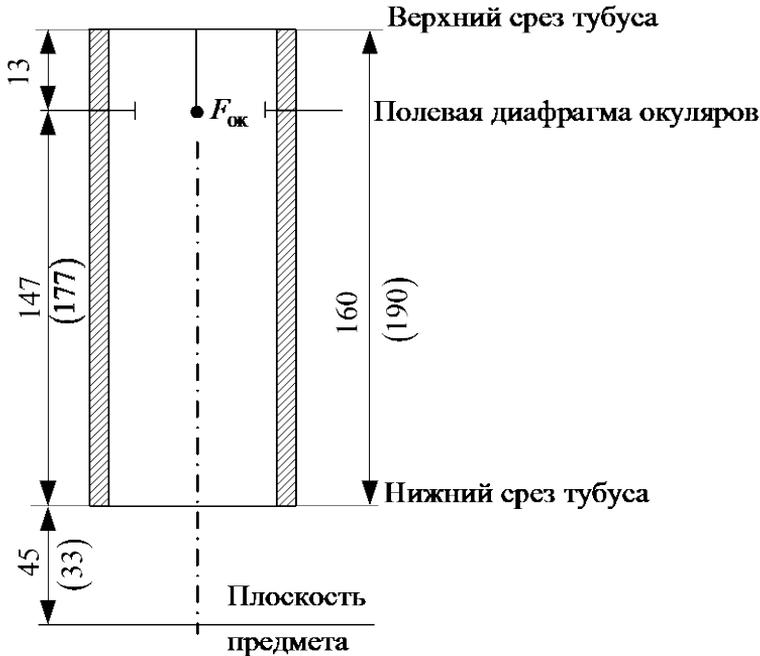


Рис. 1.61. Срез тубуса упрощенного микроскопа

В тех случаях, когда у окуляров используется сетка, для четкого ее рассмотрения необходимо некоторое перемещение окуляра в зависимости от зрения наблюдателя. Перемещение окуляра на 1 диоптрию:

$$x = \frac{f_{\text{ок}}^2}{1000}. \quad (1.3)$$

Под увеличением микроскопа принято понимать отношение размера изображения предмета на сетчатке глаза при наблюдении через микроскоп к размеру изображения того же предмета, полученного невооруженным глазом.

Входной зрачок в микроскопах обычно удален бесконечно. Выходной зрачок объектива находится в задней фокальной плоскости. Роль апертурной диафрагмы выполняет одна из оправ объектива. Величина $A = n \sin \sigma_0$ называется числовой апертурой.

Диаметр выходного зрачка микроскопа:

$$D' = \frac{500A}{\Gamma}, \quad (1.4)$$

где: A – передняя апертура микроскопа.

Глубина изображения в микроскопе без перефокусировки:

$$d = \frac{D_n}{\beta_{\text{об}}}, \quad (1.5)$$

где: D_n – диаметр полевой диафрагмы; $\beta_{\text{об}}$ – линейное увеличение объектива.

Линейное поле микроскопа окуляра:

$$T = T_b + T_a = \frac{n\lambda}{2A^2} + \frac{250}{\bar{\Gamma}^2}, \quad (1.6)$$

где: T_b – волновая глубина резкости; T_a – объем аккомодации для нормального глаза; n – показатель преломления среды; λ – длина волны; A – числовая апертура; $\bar{\Gamma}$ – видимое увеличение.

В случае проецирования изображения на экран или матовое стекло $T_a = 0$.

Предел разрешения:

$$\Phi_{\text{пр}} = \frac{\lambda}{A_{\text{об}} + A_{\text{к}}} \approx \frac{\lambda}{2A_{\text{об}}}, \quad (1.7)$$

где: $A_{\text{об}}$, $A_{\text{к}}$ – соответственно числовые апертуры объективов и конденсора.

Полезное увеличение микроскопа находится из условия полного использования разрешающей способности объектива.

Применение увеличения меньшего, чем нижний предел, не дает возможности различать все детали, которые разрешает объектив. Увеличение больше полезного не только не дает никакой дополнительной информации об объекте, а, наоборот, является вредным. Кроме того, выходной зрачок становится меньше 0,5 мм, что приводит к заметной дифракционности картины. Иногда увеличение больше полезного используется в измерительных микроскопах.

1.6.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТИВОВ МИКРОСКОПА

Принципиальная оптическая схема микроскопа состоит из трех основных оптических узлов: осветительной системы, объектива и окулярной части (монокулярной, бинокулярной или тринокулярной). Объектив является наиболее ответственным узлом микроскопа, так как от его числовой апертуры и коррекции аберраций зависят разрешающая способность и качество изображения в целом.

Объективы микроскопа классифицируются по спектральной области, для которой они рассчитаны и применяются; способу освещения наблюдаемого объекта; длине тубуса, на которую они рассчитаны; наличию покровного стекла и иммерсионной жидкости; конструктивным особенностям (линзовые, зеркально-линзовые и зеркальные).

Большое распространение получили линзовые объективы. Это вызвано прежде всего большими технологическими возможностями их изготовления по сравнению с зеркально-линзовыми. Для линзовых объективов допуски задаются значительно шире, чем для зеркально-линзовых. Кроме того, у линзовых объективов отсутствует центральное экранирование, снижающее контраст в изображении.

По степени коррекции различают следующие типы объективов: монохроматы, ахроматы, апохроматы, суперапохроматы, планобъективы. Монохроматы – это объективы, у которых аберрации исправлены для узкой спектральной

области. Объективы, у которых ахроматизация выполнена для двух длин волн, называются ахроматами. У апохроматов спектральная область расширена и ахроматизация выполняется для трех длин волн. У суперапохроматов ахроматизация выполнена для видимой и ультрафиолетовой областей спектра. У объективов с плоской поверхностью изображения существенно увеличено поле.

У монохроматов в первую очередь исправляются сферическая aberrация, кома и астигматизм. У ахроматов исправлению подлежат: сферическая aberrация, кома и астигматизм, хроматизм положения и отчасти сферохроматическая aberrация. У апохроматов и суперапохроматов кроме aberrаций, исправляемых у ахроматов, значительно лучше корректируются вторичный спектр и сферохроматическая aberrация.

Планобъективы по степени коррекции делятся на планмонохроматы, планахроматы и планапохроматы. Требования к коррекции aberrаций для точки на оси планобъективов такие же, как и для соответствующих монохроматов, ахроматов и апохроматов. Но в отличие от последних у планобъективов существенно лучше исправлены кривизна поверхности и астигматизм. На рис. 1.62 приведены оптические схемы некоторых объективов.

Оценка качества изображения объективов микроскопа производится в волновой мере. Для основной длины волны для точки на оси у всех объективов выполняется критерий Рэлея, т. е. волновая aberrация менее $0,25\lambda$. У ахроматов для всей спектральной области, на которую они рассчитаны, aberrации не более $0,5\lambda$. Для линии G' волновая aberrация порядка $(1 - 2)\lambda$. У планобъективов волновые aberrации для внеосевых точек предметов пределах всего поля не превышают $0,5\lambda$. Остаточный хроматизм увеличения у сильных объективов достигает $1,5-2,0\%$ и компенсируется применением специально рассчитанных компенсационных окуляров.

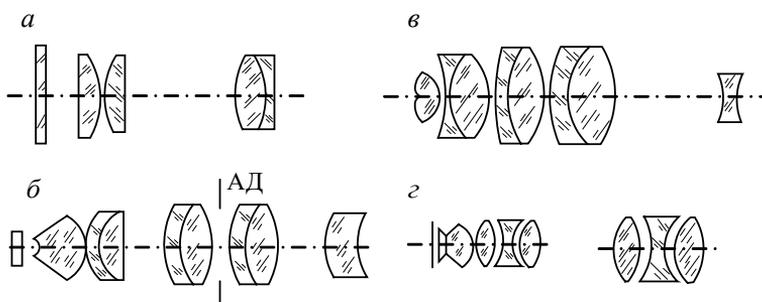


Рис. 1.62. Принципиальные оптические схемы линзовых объективов различных типов:
a – ахромат (ОХ-22); *б* – планахромат (ОПХ-25);
в – планахромат (ОПА-60); *з* – суперахромат

Приведенная классификация и количественные критерии оценки коррекции aberrаций являются до некоторой степени условными и приближенными.

Нельзя провести резкой границы, например, между ахроматом и апохроматом, ахроматом и планахроматом и т. п.

К основным оптическим и механическим характеристикам объективов относятся следующие: увеличение или фокусное расстояние, числовая апертура, длина тубуса (механическая), высота объектива, рабочее расстояние, линейное поле (обычно в пространстве изображения), наличие покровного стекла и иммерсии.

1.6.5. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОБЪЕКТИВОВ МИКРОСКОПА

Широкое распространение при расчете объективов микроскопа получил метод проб, сущность которого заключается в том, что вначале выбирается аналог с возможно близкими оптическими характеристиками к рассчитываемому объективу. Далее изучается влияние изменения конструктивных элементов на aberrации и оптические характеристики. Затем путем интерполяции или экстраполяции находят новые значения конструктивных элементов и производят контрольные расчеты хода лучей, в результате которого выясняется действительное состояние коррекции. И так повторяется несколько раз – до получения удовлетворительного решения. Этот метод достаточно эффективен, когда исходная оптическая система близка к рассчитываемой, при пересчете на планки и радиусы пробных стекол, замене марок стекол отдельных линз и в некоторых других случаях.

При расчете объективов небольшой числовой апертуры и увеличения часто используется алгебраический метод. Оптическая схема этих объективов обычно состоит из двух компонентов. Для расчета таких объективов весьма эффективна методика, основанная на применении теории aberrации третьего порядка для систем, состоящих из тонких компонентов, предложенная проф. Г. Г. Слюсаревым.

Следующий метод расчета – *комбинированный* – является рациональным сочетанием алгебраического метода и метода проб. Вначале используется алгебраический метод, и когда наступает состояние коррекции, при котором aberrации третьего порядка исправлены удовлетворительно, но в системе присутствуют остаточные aberrации высшего порядка, применяют метод проб.

В последнюю четверть века при расчете объективов микроскопа широко применяются ЭВМ. Разработан целый комплекс программ, начиная от программ для расчета хода лучей и кончая программами для автоматизированной коррекции aberrаций и оценки качества изображения. Общим для всех программ, предназначенных для автоматизированной коррекции aberrаций, является использование классического метода проб с применением различных математических приемов для оптимизации оптических систем.

Наиболее ответственным моментом во всех перечисленных способах расчета является правильный выбор исходной системы, от которого в большой степени зависят и результат и время расчета.

Сущность метода *расчета по частям*. Методика расчета объективов микроскопа по частям была разработана в СССР в начале 60-х годов. Суть метода заключается в следующем: объектив микроскопа условно разделяется на две части, рассчитываемые в начальной стадии самостоятельно, но так, чтобы, во-первых, при соединении обеих частей у объектива были получены заданные оптические характеристики (увеличение, фокусное расстояние, числовая апертура, поле, длина тубуса, рабочее расстояние) и, во-вторых, обеспечена необходимая для данного типа коррекция aberrаций. Первая часть – фронтальная, вторая – последующая. Оптические схемы обеих частей в зависимости от оптических характеристик и типов объективов разнообразны. Различны и способы их расчета.

При расчете фронтальной части, через которую проходят пучки лучей со значительной числовой апертурой, используются свойства апланатических точек поверхностей. Благодаря этому апертурный угол для последующей части существенно снижается, при этом фронтальная часть не вносит значительных aberrаций.

Последующая часть, так как числовая апертура у нее сравнительно невелика, в первом приближении может быть рассчитана алгебраическим методом с применением теории aberrации третьего порядка, которая позволяет определить необходимое число компонентов в оптической схеме и выбрать их тип.

Окончательная коррекция aberrаций производится на ЭВМ по программам для автоматизированной коррекции aberrаций. Приведем некоторые соотношения, которые должны выполняться при габаритном и aberrационном расчетах по этой методике.

Фронтальная часть в виде «толстого» мениска часто используется при расчете объективов с плоским полем. Конструктивные элементы могут быть вычислены следующим образом:

$$r_1 = \frac{s_1 \beta (n-1)}{n^2 - \beta}; r_2 = \frac{1-n}{n s_{IV} + \frac{1-n}{r_1}}; d = \frac{s_1 \beta - r_2 (n+1)}{n}, \quad (1.8)$$

где: r_1 и r_2 – соответственно радиусы преломления поверхностей мениска; d – толщина мениска; n – показатель преломления; s_1 – рабочее расстояние; s_{IV} – сумма Петцваля; β – линейное увеличение.

Коррекционной особенностью такого мениска является то, что изображение предмета, даваемое первой поверхностью, совпадает с апланатической точкой второй поверхности.

Линейное увеличение β и задний отрезок s_2' определяются по формулам:

$$\beta = \frac{n^2}{[(n-1)k+1]}; s_2' = r_2(1+n). \quad (1.9)$$

где: $k = \frac{s_1}{r_1}$.

При расчете высокоапертурных объективов надо всегда иметь в виду, что за толстым мениском располагается дополнительно один или несколько апланатических менисков. Особенностью склеенного фронтального мениска для иммерсионных объективов является то, что показатели преломления иммерсии, покровного стекла и первой линзы одинаковы. Осевая точка предмета находится в центре кривизны второй поверхности, а ее изображение совпадает с апланатической точкой третьего типа третьей поверхности; конструктивные элементы могут быть вычислены по формулам:

$$r_1 = \infty; r_2 = s_1 - d_1; r_3 = \frac{r_2 - d_2}{1 + \frac{1}{n_2}};$$

$$d_2 = \frac{1 + \frac{1}{n_2}}{s_{IV} \frac{1}{n_2 + n_1} - \frac{1}{r_2}}; \quad (1.10)$$

$$\beta = n_1 n_2; s'_3 = r_3(1 + n_2); r_1 = \infty; r_2 = s_1 - d_1; r_3 = \frac{r_2 - d_2}{1 + \frac{1}{n_2}}; d_2 = \frac{1 + \frac{1}{n_2}}{s_{IV} \frac{1}{n_2 + n_1} - \frac{1}{r_2}}; \beta =$$

$$n_1 n_2; s'_3 = r_3(1 + n_2)$$

где: d_1 и d_2 – толщины линз; n_1 и n_2 – показатели преломления оптических сред линз; r_3 – радиус преломления поверхности мениска; s'_3 – задний отрезок. Последующая часть в виде двух компонентов, разделенная конечным воздушным промежутком, удовлетворяет всем требованиям габаритного и абберрационного расчетов.

При условии нормирования $h_1 = f' = 1$; $\alpha_1 = 0$; $\alpha_3 = 1$ (длина тубуса – «бесконечность») имеем $\Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2 = 1$; $1 - d\Phi_1 - s'_{II}$. Здесь Φ_1, Φ_2 – оптические силы компонентов; d – расстояние между компонентами; s'_{II} – задний отрезок последующей части; h_1 – расстояние от оптической оси до точки преломления меридионального луча.

Практически удобно выразить оптические силы компонентов Φ_1 и Φ_2 через α_2 . Тогда имеем одно уравнение: $1 - d\alpha_2 = s'_{II}$.

Для его решения одной из величин следует придавать некоторые численные значения.

Реальные фокусные расстояния компонентов находятся из формул:

$$f'_1 = \frac{f'_{II}}{\alpha_2}; f'_2 = \frac{f'_{II}(1 - d\alpha_2)}{1 - \alpha_2}; \quad (1.11)$$

$$f'_{II} = f'_0 \beta_{\Phi}; s'_{II} = -s'_{\Phi} + \delta, \quad (1.12)$$

где: f'_0 – фокусное расстояние объектива; s'_{Φ} – задний отрезок фронтальной части; δ – расстояние между последней поверхностью фронтальной части и вторым компонентом последующей части; f'_{II} – фокусное расстояние последующей части; f'_1, f'_2 – фокусные расстояния первой и второй частей; α_2 –

угол параксиального луча с осью в пространстве предметов. В случае, когда предмет расположен на конечном расстоянии:

$$\alpha_1 = \beta_n; \alpha_3 = 1; f'_s = s_1 \alpha_1; s'_n = s_1 \beta_n - d \alpha_2. \quad (1.13)$$

Увеличение последующей части β_n находится из условия компоновки фронтальной и последующей частей:

$$\beta_n = \frac{\beta_\phi}{\beta_o}, \quad (1.14)$$

где: β_o, β_ϕ – соответственно увеличение всего объектива и фронтальной части. Фокусные расстояния для этого случая определяются из выражений:

$$f'_1 = \frac{s_1 \beta_n}{\alpha_2 - \beta_n}; f'_2 = (s_1 - d \alpha_2)(1 - \alpha_2). \quad (1.15)$$

Коэффициент Петцваля:

$$s_{IV(n)} = \sum_1^2 \Phi \pi \approx \pi(\Phi_1 + \Phi_2). \quad (1.16)$$

Относительные диаметры компонентов:

$$\frac{D_1}{f'_1} = \frac{2A_0(\alpha_2 - \alpha_1)}{\beta_\phi}; \frac{D_2}{f'_2} = (s_1 - d \alpha_2)(1 - \alpha_2), \quad (1.17)$$

где: A_0 – числовая апертура объектива; α_1 и α_2 – параксиальные углы; D_2 – расстояние между компонентами.

Предварительный абберационный расчет последующей части. Абберации последующей части рассчитываются так, чтобы они в первом приближении были равны по абсолютному значению соответствующим абберациям фронтальной части, но противоположны по знаку (для продольных аббераций). Условиями исправления абберации объектива являются:

$$\Delta s'_n = -\Delta s'_\phi; \eta_n = \eta_\phi; \\ (z'_s - z'_m)_n = -(z'_s - z'_m)_\phi; \quad (1.18)$$

$$\Delta s'_\pi = -\Delta s'_\phi; \eta_\pi = \eta_\phi; (z'_s - z'_m)_\pi = -(z'_s - z'_m)_\phi; S_{IV(\pi)} = -S_{IV(\phi)}; s_{IV(n)} = -s_{IV(\phi)};$$

$$\Delta s'_{f.c(n)} = -s'_{f.c(\phi)}; \\ \Delta s'_{f.d(n)} = -\Delta s'_{f.d(\phi)}; \quad (1.19) \\ \Delta y'_{f.c(n)} = \Delta y'_{f.c(\phi)},$$

где: $\Delta s'$ – продольная сферическая абберация; η – величина, характеризующая отступление от условия изопланатизма и определяющая кому; $z'_s - z'_m$ – астигматическая разность; $\Delta s'_{f.c}$ и $\Delta s'_{f.d}$ – хроматическая разность положения; $\Delta y'_{f.c}$ – хроматическая разность увеличения.

Дисторсия в объективах микроскопа (за исключением объективов специального назначения), как правило, не подлежит исправлению вследствие сравнительно малого поля.

ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ

Вопрос 1	Что принято понимать под увеличением микроскопа?
Ответы:	
1	Под увеличением микроскопа принято понимать отношение размера изображения предмета на сетчатке глаза при наблюдении через микроскоп к размеру изображения того же предмета, полученного невооруженным глазом
2	Под увеличением микроскопа принято понимать числовое значение, изображенное на объективе микроскопа
3	Под увеличением микроскопа принято понимать числовое значение, изображенное на окуляре микроскопа
Вопрос 2	Какие объективы называется монохроматическими?
Ответы:	
1	Это объективы, у которых аберрации исправлены для узкой спектральной области
2	Это объективы, которые позволяют видеть предмет только в контрастном черно-белом изображении
3	Это объективы, которые позволяют видеть предмет только в полутонах серого изображения
Вопрос 3	Какие объективы называются ахроматическими?
Ответы:	
1	Объективы, у которых ахроматизация выполнена для двух длин волн
2	Объективы, у которых ахроматизация выполнена для трех длин волн
3	Объективы, у которых ахроматизация выполнена для пяти длин волн
Вопрос 4	Какие объективы называются апохроматическими?
Ответы:	
1	Объективы, у которых спектральная область расширена и ахроматизация выполняется для трех длин волн
2	Объективы, у которых спектральная область расширена и ахроматизация выполняется для четырех длин волн
3	Объективы, у которых спектральная область расширена и ахроматизация выполняется для пяти длин волн
Вопрос 5	Какие объективы называются суперапохроматическими?
Ответы:	
1	Объективы, у которых ахроматизация выполнена для видимой и ультрафиолетовой областей спектра
2	Объективы, у которых ахроматизация выполнена для рентгеновской области спектра
3	Объективы, у которых ахроматизация выполнена для инфра-

	красной области спектра
Вопрос 6	Какие из перечисленных параметров относятся к основным характеристикам объективов?
Ответы:	
1	Фокусное расстояние, числовая апертура
2	Диаметр линзы, угол зрения
3	Величина диафрагмы, разрешение