

Л.А. Запрягаева

# **ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА**

## **ЧАСТЬ 1. ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

МОСКВА  
2017

### **Рецензенты:**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(кандидат техн. наук, доцент **Т.С. Ровенская**);

доктор техн. наук, профессор **В.А. Соломатин** (МИИГАиК)

### **Запрягаева Л.А.**

Прикладная оптика. Часть 1. Введение в теорию оптических систем: Учебное пособие для вузов. –М.: МИИГАиК, 2017. – 112 с.: ил.

Приведена классификация оптических систем, применяемых в оптических и оптико-электронных приборах, а также теория и расчет основных оптических характеристик в различных системах. К ним относятся масштаб изображения, угловое и линейное поле, освещенность изображения и светосила оптических систем, качество изображения. Рассмотрено распределение освещенности в дифракционном изображении точки на оси для систем со сплошным и экранированным зрачками и влияние на него аберраций и формы апертурной диафрагмы. Дано представление об аподизации и его применение при разработке оптических систем. Рассмотрены разрешающая способность и критерии ее оценки в различных оптических системах, а также волновые критерии и классификация систем по волновым аберрациям. Приведена теория универсального критерия оценки качества изображения — оптической передаточной функции.

Представлено строение глаза человека, его свойства и его классические модели, используемые при разработке визуальных систем, и на основании этого приведены требования к оптическим системам визуальных оптических приборов. В приложениях даны справочные материалы по оптическим постоянным бесцветного оптического стекла, для расчета линз, краткий этимологический справочник оптических терминов и др.

Учебное пособие является дополнением к учебнику «Расчет и проектирование оптических систем» и введением в курс прикладной оптики.

Для студентов оптических специальностей вузов, обучающихся по профилю «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» и бакалавров по направлениям «Оптотехника» и «Лазерная техника и лазерные технологии».

## Предисловие

«Прикладная оптика» является одной из базовых дисциплин при подготовке специалистов по профилю «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» и бакалавров по направлениям «Оптотехника» и «Лазерная техника и лазерные технологии».

В настоящее время основным учебником по дисциплине «Прикладная оптика» является «Расчет и проектирование оптических систем» [1], фактически включающий теоретический материал по трем дисциплинам: «Прикладная оптика», «Зеркальные и зеркально-линзовые оптические системы» и большую часть материала по дисциплине «Расчет и проектирование оптических систем» и для подготовки магистров — «Синтез оптических систем». Однако в учебнике не уделено должного внимания основным характеристикам оптических систем (ОС) приборов разного назначения, а также отсутствует раздел, рассматривающий оптическую систему глаза и его свойства, что важно знать при проектировании широкого класса оптических систем визуальных приборов. Издание данного учебного пособия, по мнению автора, восполнит этот пробел.

В современном толковании и в соответствии с учебным планом курс прикладной оптики можно разделить на две части, одна из которых — «Оптические системы приборов», включающая схемотехнику и габаритный расчет ОС. Часто первую часть называют «Теорией оптических систем». Вторая часть — «Основы теории и проектирования ОС оптических и оптико-электронных приборов», рассматривающая основы автоматизированного проектирования, теорию и синтез ОС.

Основной теоретической базой для освоения дисциплины «Прикладная оптика» являются знания, полученные студентами при изучении физики, высшей математики, информатики и особенно волновой оптики, основ геометрической оптики и теории аберраций ОС.

## Введение

Зарождение прикладной оптики как науки произошло в начале XVII века, еще до появления закона преломления [2, 3]. Первая теория оптических приборов — зрительной трубы, микроскопа и глаза была создана И. Кеплером в 1611 г. и описана в его «Диоптрике». Он впервые указал, как найти изображения, даваемые линзами, объяснил работу окуляра в зрительной трубе и микроскопе, понял роль хрусталика и сетчатки глаза, обнаружил явления аккомодации и адаптации.

Ранее в 1609 г. была изготовлена труба Г. Галилея, хотя в 1590 г. в Нидерландах появилась первая зрительная труба, изготовленная очковым мастером .

Дальнейшее развитие прикладной оптики было невозможно без закона преломления. Он был экспериментально установлен и сформулирован голландским ученым Виллебродом Снеллем (Снеллиусом) в 1620 г. [4, 5], но не опубликован, а в 1626 г. Снелль умер. Независимо от него в 1637 г. закон преломления был установлен французским математиком и философом Рене Декартом [6, см. 4, 5]. Он в дальнейших своих работах затрагивает многие вопросы, связанные с созданием и развитием теории построения и расчета оптических систем не только со сферическими, но и с асферическими поверхностями.

Свой значительный вклад в развитие прикладной оптики внес И. Ньютон, который получил основные формулы паракиальной оптики, вывел формулы для вычисления сферической аберрации, изготовил параболидный телескоп (1668 г.), открыл дисперсию света, но сделал ошибочный вывод о невозможности исправления хроматизма в ОС и тем самым способствовал развитию зеркальных телескопов. Здесь стоит назвать предложенные схемы двухзеркальной телескопической системы М. Мерсенна (1634 г.), двухзеркальных объективов Д. Грегори (1663 г.) и Л. Кассегрена (1672 г.) с асферическими поверхностями с полностью исправленной сферической аберрацией. Эти системы можно встретить во многих обсерваториях мира в настоящее время.

Большой вклад в развитие прикладной оптики внес великий рос-

сийский ученый М.В. Ломоносов. В общей сложности он построил более десяти оригинальных оптических приборов. Им был предложен в 1762 г. однозеркальный телескоп без центрального экранирования с наклоном зеркала к оптической оси. Аналогичную конструкцию независимо от него предложил В. Гершель в 1774 г., спустя 12 лет. По словам академика С.И. Вавилова, М.В. Ломоносов был «одним из самых передовых оптиков своего времени и безусловно первым русским творческим оптотехником». Так зарождалась прикладная оптика.

О дальнейшем развитии прикладной оптики в XIX–XX вв., ее достижениях и вкладе в науку отечественных и зарубежных ученых можно найти информацию в книге В.А. Гурикова [7] и введениях к учебным пособиям [3, 8].

Первый отечественный учебник по теории оптических инструментов был написан и издан в 1915 г. выдающимся ученым и педагогом Н.М. Кисловым — первым избранным ректором нашего института, в те годы называвшимся Константиновским межевым институтом. В основу учебника был положен курс лекций под аналогичным названием, который Н.М. Кислов читал с 1902 г. Практически его книга была одним из первых трудов по оптике на русском языке.

Во второй половине XX в. и начале XXI в. в связи с небывалым и грандиозным развитием науки и техники, о котором не могли мечтать даже писатели-фантасты, постепенно менялась методология изучения разных наук.

В связи с появлением новой элементной базы, непрерывным развитием компьютеров новых поколений, обновлением программного обеспечения развивается и совершенствуется прикладная оптика как наука.

# РАЗДЕЛ 1

## КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 1.1. Оптическая система (ОС)

Основной частью любого оптического или оптико-электронного прибора является оптическая система (ОС). ОС — это совокупность оптических (прозрачных, однородных) сред, разделённых оптическими поверхностями и содержащих диафрагмы. ОС предназначена для формирования оптического изображения или для другого требуемого преобразования светового потока, идущего от источника света, посредством перераспределения электромагнитного поля, исходящего от предмета.

Физически ОС — совокупность оптических деталей (линз, призм, зеркал и их комбинаций, дифракционных и голограммных оптических элементов (ДОЭ и ГОЭ) и т.п.), а также диафрагм, расположенных друг относительно друга в соответствии с расчётом.

Оптической называется деталь, изготовленная из материала, пропускающего, отражающего, рассеивающего или поглощающего световой поток и имеющая поверхности заданной формы.

ОС преимущественно — центрированные системы, т.е. системы, состоящие из оптических деталей, ограниченных плоскими, сферическими или асферическими, преломляющими или отражающими поверхностями с общей осью вращения, называемой оптической осью [3, 9].

Конструктивными параметрами (элементами) ОС являются радиусы кривизны оптических поверхностей  $r_v$ , расстояния между вершинами поверхностей  $d_v$ , оптические постоянные материалов  $n_{\lambda_0}$ ,  $\nu_{\lambda_0}$ , а также световые  $D_{св}$  и полные  $D_{пол}$  диаметры поверхностей или

компонентов, размеры призм, зеркал, плоскопараллельных пластин (ППП) и т.д., которые записываются следующим образом:

	$n_c$	$\nu_c$	Марка стекла	$D_{св}$	$D_{пол}$
$r_1=87,9$				48,2	50
$d_1=9,8$	1,5183	63,83	К8		
$r_2=-83,95$				47,7	50
$d_2=0,2$					
$r_3=-83,7$				47,6	50
$d_3=5,0$	1,6520	33,62	ТФ1		
$r_4=-397,2$				46,8	50
$d_4=142,6$					
$r_5=-32,66$				13,1	15
$d_5=1,5$	1,5183	63,83	К8		
$r_6=\infty$					
	$\sum d=159,1$				
	$f'=239,49$	$s_F=-815,40$		$s'_F=24,8$	

В качестве примера представлены конструктивные параметры телеобъектива телескопической системы см. [1]. Если ОС расположена в воздухе, как в приведённом примере, то в оптическом выпуске не указываются значения показателей преломления воздуха  $n_1=n'_k=1$  и это же значение в воздушных промежутках и наименование среды — воздуха. В остальных случаях значения показателей преломления и коэффициентов дисперсии, а также названия оптических сред, в которых расположена ОС, обязательно записываются.

Для зеркальных и зеркально-линзовых систем записываются значения показателей преломления среды до и после отражения от каждой оптической поверхности, как показано ниже.

Конструктивные параметры зеркальной системы типа Кассегрена:

$r_1=-316,128$		$n_1=1$
	$d_1=-98$	$n_2=-1$
$r_2=-216,058$		$n_3=-1$
	$f'_{ог}=350 \text{ мм}$	

## 1.2. Классификация ОС

Блок–схема классификации приведена на рис. 1.

Предмет и изображение в зависимости от их положения ( $s_1, s'_k$ ) относительно ОС разделяют на два вида — дальнего типа, если  $s_1 = -\infty, s'_k = \infty$ , и ближнего типа, когда  $s_1 \neq -\infty, s'_k \neq \infty$ .

Признаки классификации:

I. Расположение предмета ( $s_1$ ) относительно ОС, т.е. дальность действия.

II. Расположения предмета и изображения ( $s_1$  и  $s'_k$ ) относительно ОС.

III. Вид приёмника излучения (ПИ).

IV. Виды поверхностей (принцип действия).

Обычно основной считают классификацию по расположению предмета и изображения [9].

Рассмотрим ОС по каждому признаку классификации.

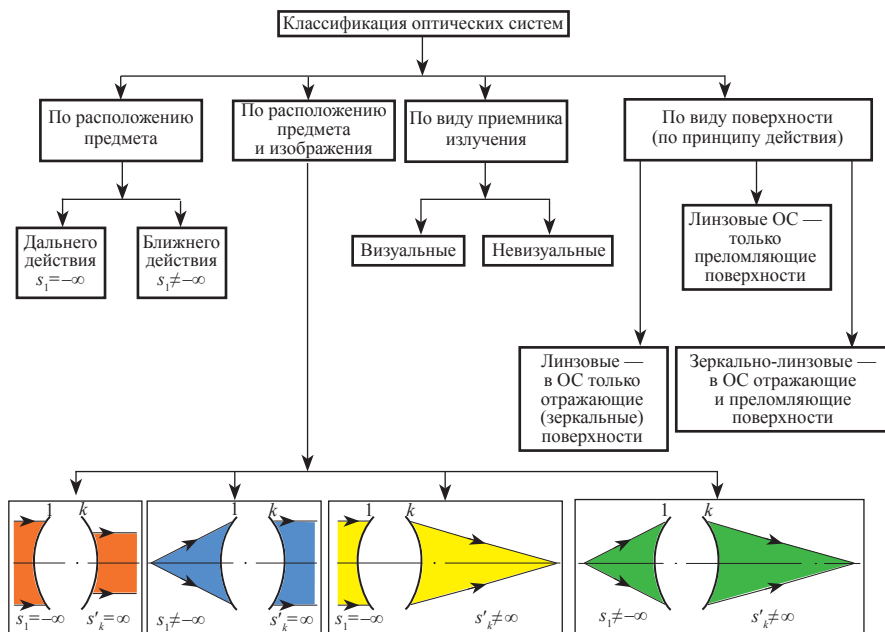


Рис. 1. Классификация оптических систем



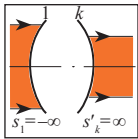
I. По первому признаку все оптические системы разделяются на две большие группы: **дальнего действия**, если предмет находится в бесконечности ( $s_1 = -\infty$ ) или на значительном удалении от ОС (от нескольких метров и более), и **ближнего действия**, когда предмет расположен на конечном расстоянии ( $s_1 \neq -\infty$ ) от системы, т.е. близко расположен от нескольких дециметров и менее).

К первой группе, к ОС **дальнего действия**, относятся ОС астрономических телескопов, космических аппаратов, зрительных труб различного назначения, фотографические и киносъёмочные объективы, ОС ОЭП и аэрофотоаппаратов (АФА) и т.п.

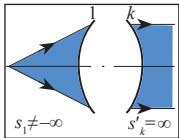
В большинстве ОС первой группы между предметом и ОС находится атмосфера, действие которой во многих случаях приходится учитывать, например, рефракцию воздуха.

Ко второй группе, к ОС **ближнего действия** относятся ОС микроскопов, лупы, ОС проекционных и осветительных приборов, объективы коллиматоров и т.п.

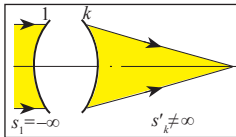
II. По второму признаку ОС разделяются на четыре вида (см. рис. 1):



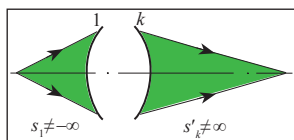
1. Предмет и изображение — **дальнего типа**, т.е. расположены в бесконечности: ( $s_1 = -\infty$ ,  $s'_k = \infty$ ). К этому виду ОС относятся **телескопические системы** различного назначения: астрономических и космических телескопов, зрительных труб, системы для коллимации лазерного излучения, афокальные насадки ОС переменного увеличения и т.п.



2. Предмет — **ближнего типа** ( $s_1 \neq -\infty$ ), изображение — **дальнего типа** ( $s'_k = \infty$ ). Сюда относятся **лупы, ОС микроскопов, коллиматоров, стереоскопов, окуляров** и т.п., для которых характерен **близко расположенный предмет**, находящийся в **передней фокальной плоскости ОС**, и изображение, сформированное ОС в бесконечности.



3. Предмет — **дальнего типа** ( $s_1 = -\infty$ ), изображение — **ближнего типа** ( $s'_k \neq \infty$ ). К данному виду ОС относятся различные **объективы**: фотографические, киносъёмочные, ОЭП, АФА и т.п. Особенностью этих ОС является предмет, находящийся практически в бесконечности и изображение, формируемое в **задней фокальной плоскости системы**.



4. Предмет и изображение — ближнего типа, расположены на конечном расстоянии от ОС ( $s_l \neq -\infty$ ,  $s'_k \neq \infty$ ). Это — проекционные и репродукционные объективы, ОС осветительных приборов и т.п.

III. По третьему признаку — по виду приёмника излучения — ОС делятся на два типа — **визуальные** и **невизуальные** (см. рис. 1).

В большинстве визуальных систем обязательно есть окуляр, и приёмником является глаз наблюдателя, поэтому изображение — дальнего типа. В ряде систем, например, проекционных, нет окуляра, изображение формируется на экране или дисплее, но которое рассматривается глазом.

ОС **визуальных** приборов делятся на две основные группы.

1. ОС зрительных труб, предназначенных для наблюдения или измерения удалённых предметов, сюда относят также системы с электронно-оптическими преобразователями.

2. ОС микроскопов, служащих для наблюдения или измерения близко расположенных предметов, стереоскопов, лупы и др.

В **невизуальных** ОС приёмником изображения может служить светочувствительный слой фото- или киноплёнки, различные фотоэлектронные устройства (фотокатод телевизионного приёмника или ЭОП, ПЗС-матрица и т.п.). Основной частью большинства невидуальных ОС оптико-механических и оптико-электронных приборов является объектив.

По четвертому признаку — по виду поверхностей ОС разделяются на три группы:

**линзовые** (диоптрические) системы, в которых применяются только преломляющие поверхности;

**зеркальные** (катоптрические) системы, в которых применяются только отражающие (зеркальные) поверхности;

**зеркально-линзовые** (катадиоптрические) системы, в которых используются как отражающие, так и преломляющие поверхности.

По этим же признакам классифицируют и **оптические приборы**, но добавляется классификация по области применения [10]:

**приборы, формирующие изображение** (телескопы, зрительные трубы, микроскопы, проекционные приборы, телевизионные камеры, тепловизионные камеры — тепловизоры и т.п.);

**осветительные системы** (системы для канализации оп-

тического излучения) — осветители, прожекторы, станции оптических помех;

оптико-физические приборы (интерферометры, монохроматоры, спектрофотометры, спектрографы, относящиеся к спектральным приборам, рефрактометры, поляриметры, эллипсометры и т.п.);

фотометрические приборы (фотометры, радиометры, пирометры и т.д.);

специальные оптические приборы — (приборы оптической связи, оптические локаторы, оптические пеленгаторы, приборы наведения по оптическому лучу, головки самонаведения):

квантовые приборы (оптические гироскопы).

## РАЗДЕЛ 2

### ОСНОВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОС

К основным оптическим характеристикам ОС относятся:

- масштаб изображения;
- угловое или линейное поле;
- светосила и освещённость изображения;
- спектральные характеристики;
- качество изображения (эта тема будет рассмотрена в разд. 3).

#### 2.1. Масштаб изображения

Для систем, у которых  $s_1 \neq -\infty$ ,  $s'_k \neq \infty$ , когда и предмет, и изображение ближнего типа (рис. 2) (проекционные, репродукционные ОС и т.п.) масштаб изображения (МИ) характеризуется линейным увеличением  $\beta$ :

для идеальной системы

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} = -\frac{z'}{f'} = \frac{n_1 \alpha_2}{n'_k \alpha'_k}; \quad (1)$$

в области действительных лучей

$$\tilde{\beta} = \frac{\tilde{y}'}{y} = \frac{n_1 \sin \sigma_1}{n'_k \sin \sigma'_k}; \quad (2)$$

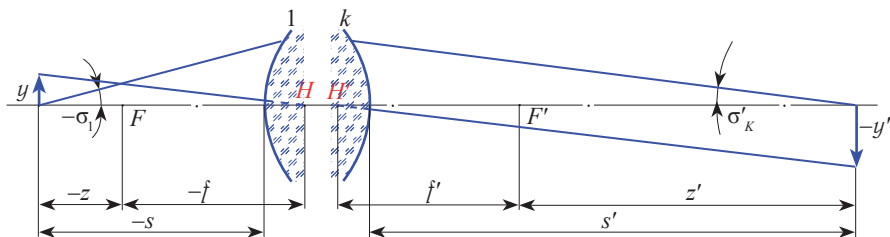


Рис. 2. Оптическая система ближнего действия с изображением ближнего типа

в параксиальной области

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{n_1 \alpha_1}{n'_k \alpha'_k}. \quad (3)$$

К оптическим системам с  $s_1 = -\infty$ ,  $s'_k \neq \infty$ , у которых предмет — дальнего типа, изображение — ближнего типа, относятся фотографические, аэрофотографические объективы и т.п.

При съемке значительно удаленного предмета, когда расстояние до него в десятки и сотни раз превышает фокусное расстояние объектива ( $s_1 = -\infty$ ), изображение получается в задней фокальной плоскости объектива, поэтому величина изображения  $2y' = 2f'_{об} \operatorname{tg} \omega$ . Для фотообъективов МИ на снимке определяется величиной  $2f'_{об}$ . В случае конечного расстояния  $s_1$  до предмета при одной и той же величине  $z$  до предмета линейное увеличение  $\beta$  будет тем больше, чем больше фокусное расстояние  $f'_{об}$  (1). Поэтому при крупномасштабных съемках используют длиннофокусные объективы.

При близком расстоянии  $s_1$  до предмета (рис. 3) изображение смещается относительно фокальной плоскости объектива на расстояние  $z'$ . Если  $|s_1| \gg f'_{об}$ , то  $z'$  — малая величина по сравнению с фокусным расстоянием,  $z' \ll f'_{об}$ . Обычно смещение  $z'$  плоскости изображения относительно заднего фокуса  $F'_{об}$  мало и равно  $z' = (0,1 \dots 0,06 f'_{об})$ . Величину  $z'$  называют оптической длиной камеры [9] и обозначают  $\Delta_K$ ,  $z' = \Delta_K$ . Формулу МИ можно представить в следующем виде:

$$\beta = -\frac{\Delta_K}{f'_{об}}. \quad (4)$$

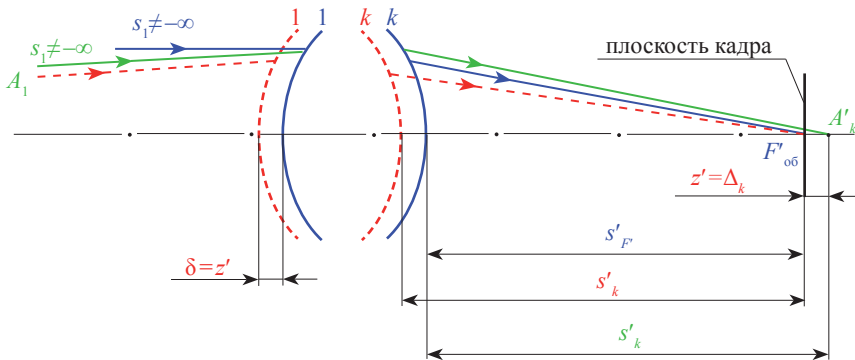


Рис. 3. Оптическая система дальнего действия с изображением ближнего типа

Поскольку  $z'$  мало, то и значение МИ получается малым в соответствии с формулой (4), поэтому при фотографировании получают снимки в уменьшенном масштабе. Только при макрофотографии получают снимки в увеличенном масштабе.

Для малоформатных камер величину  $\Delta_k$  устанавливают перемещением объектива (см. рис. 3). В процессе фотографирования предметов, расположенных на разных расстояниях, плоскость изображения (плоскость кадра) остается неподвижной. Поэтому для компенсации смещения  $z' = \Delta_k$  необходимо перемещать фотообъектив в направлении стрелки (см. рис. 3) на расстояние  $\delta$ , равное расфокусировке  $z'$ . Новое положение объектива на рисунке показано пунктиром. Очевидно, что чем ближе расположен предмет, тем больше величина расфокусировки  $z'$ .

Для объективов аэрофотоаппаратов, называемых аэрофотографическими, плоскость изображения расположена в задней фокальной плоскости объектива вследствие значительной удаленности предметов. Поэтому можно считать, что  $z \approx s_1$ , так как  $|z| \gg |s_f|$  и тогда масштаб изображения

$$\text{МИ} = m = \frac{f'_{\text{об}}}{s_1}. \quad (5)$$

МИ выражается обычно как 1:М и его записывают 1:5000, 1:10000 и т.п., как это принято в картографии. Формулой (5) можно также пользоваться для характеристики масштаба изображения малоформатных камер при пейзажных съемках.

К оптическим системам с изображением дальнего типа ( $s'_k = \infty$ ) преимущественно относятся визуальные системы: телескопические системы, ОС микроскопов, луп, окуляров и т.п. В этих системах МИ характеризуется видимым увеличением  $\Gamma$ .

В соответствии с определением видимого увеличения

$$\Gamma = \frac{\text{tg } \alpha'}{\text{tg } \alpha}, \quad (6)$$

где  $\alpha'$  — угол, под которым виден предмет вооруженным глазом (т.е. через ОС);  $\alpha$  — угол, под которым виден предмет невооруженным глазом (рис. 4).

Как видно из рис. 4,  $y = -p \text{tg } \omega$ ,  $y' = -p' \text{tg } \omega'$ ; тогда  $\text{tg } \alpha = -\frac{y}{R} = \frac{p \text{tg } \omega}{R}$ , а  $\text{tg } \alpha' = -\frac{y'}{R'} = \frac{p' \text{tg } \omega'}{R'}$ . В результате формула (6) после подстановок при-

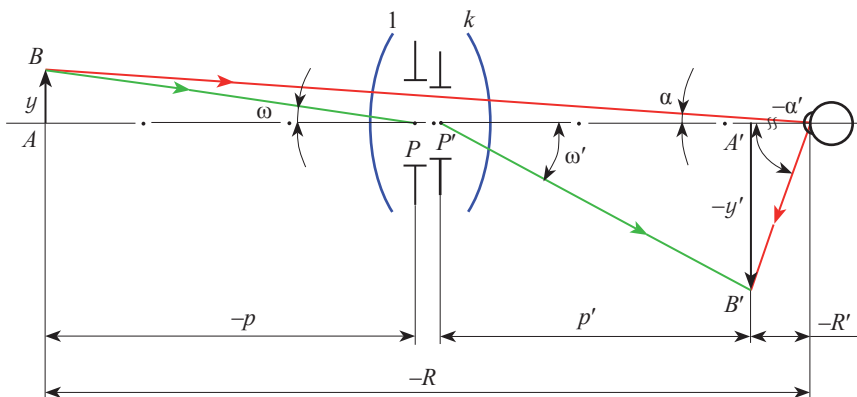


Рис. 4. Иллюстрация к определению видимого увеличения ОС

нимает вид:

$$\Gamma = \frac{p' \operatorname{tg} \omega' R}{p \operatorname{tg} \omega R'}. \quad (7)$$

Из геометрической оптики известно, что угловое увеличение  $\gamma_p$  в зрачках  $\gamma_p = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega}$ . Перейдем от углового  $\gamma_p$  увеличения в зрачках к линейному  $\beta_p$ , учитывая формулу зависимости этих увеличений:  $\beta_p \gamma_p = -\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'}$ . Отсюда получим  $\gamma_p = \frac{n}{n' \beta_p}$  и с учетом этого преобразуем (7):

$$\Gamma = \gamma_p \frac{p' R}{p R'} = \frac{n}{n' \beta_p} \frac{p' R}{p R'}. \quad (8)$$

Из (8) можно получить формулу видимого увеличения  $\Gamma$  для любой ОС с изображением дальнего типа.

В результате получено, что масштаб изображения телескопической системы и микроскопа определяется видимым увеличением.

Если ОС телескопическая, то  $R \approx p$ ,  $R' \approx p'$ , поэтому из (8) получаем:

$$\Gamma_T = \gamma_p = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega}. \quad (9)$$

Телескопическая система, работающая совместно с глазом, называется зрительной трубой. Она относится к наблюдательным

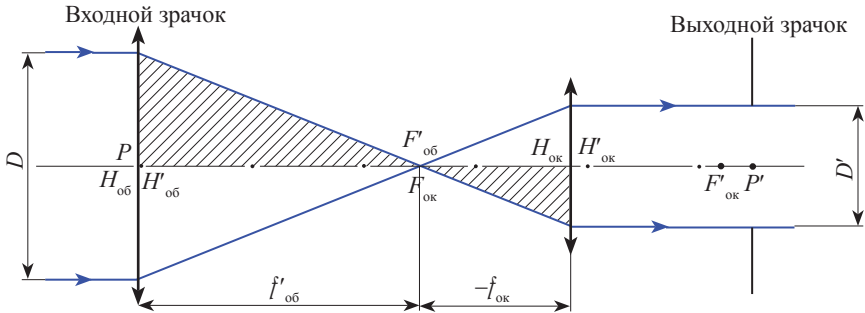


Рис. 5. Упрощенная схема телескопической системы Кеплера

приборам. Простая зрительная труба (телескопическая система) состоит из объектива и окуляра и для видимого увеличения можно записать:

$$\Gamma_T = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}} = \frac{D}{D'}$$

Последнюю формулу можно получить из (9), используя рис. 5 и связь увеличений  $\beta_P$  и  $\gamma_P$  в зрачках для ОС в воздухе:  $\beta_P = \frac{1}{\gamma_P} = \frac{D'}{D}$ ;  $\gamma_P = \frac{D}{D'}$ .

Из заштрихованных треугольников на рис. 5 видно, что

$$\frac{-D'/2}{D/2} = \frac{f'_{ок}}{f'_{об}} = \beta_P, \text{ тогда } \gamma_P = \Gamma_T = \frac{D}{D'} = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}}.$$

Для ОС микроскопа (лупы) из (8) можно получить  $\bar{\Gamma}_M = \frac{250}{f'_M}$ .

## 2.2. Линейное и угловое поле оптической системы

Поле ОС — часть пространства предметов, наблюдаемая при помощи ОС. Поле ОС может определяться либо в линейной, либо в угловой мере как для пространства предметов, так и для пространства изображений.

В случае предмета (изображения) ближнего типа [ $s_1 \neq -\infty$ , ( $s'_k \neq \infty$ )] ОС имеет линейное поле  $2y$  (мм) в пространстве предметов, а также линейное поле  $2y'$  (мм) в пространстве изображений (рис. 6) и характеризуется наибольшим размером изображаемой части пространства предметов (изображения) (плоскости предмета или изображения), расположенного на конечном расстоянии  $s_1$  ( $s'_k$ ). К таким ОС относятся



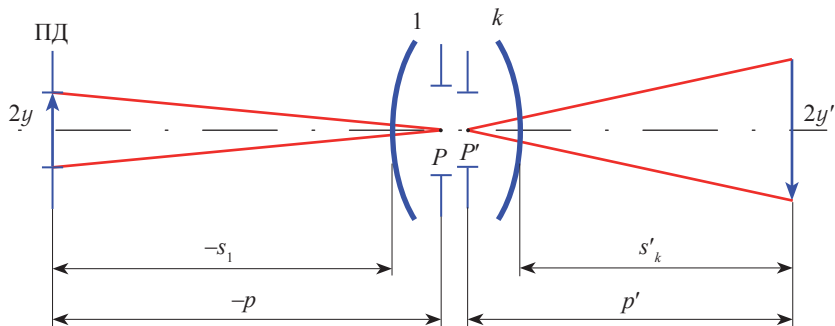


Рис. 6. ОС ближнего действия с предметом и изображением ближнего типа

проекторные и репродукционные объективы (см. рис. 1).

В случае предметов дальнего типа ( $s_1 = -\infty$  — телескопические системы, фото- или аэрофотообъективы, объективы ОЭП и т.д.), ОС характеризуется угловым полем  $2\omega$ .

На рис. 7 показана схема фотообъектива, являющегося ОС дальнего действия, который имеет угловое поле  $2\omega$  в пространстве предметов и  $2\omega'$  — в пространстве изображений. Когда говорят об угловом поле фотообъектива, всегда имеют в виду поле в пространстве предметов.

Поле системы ограничивается полевой диафрагмой (ПД), которая устанавливается в плоскости действительного изображения, иногда в предметной плоскости в кадровом окне, (например, в проекционных системах) или в плоскости изображения всей системы (в фотообъективах — рамка кадра).

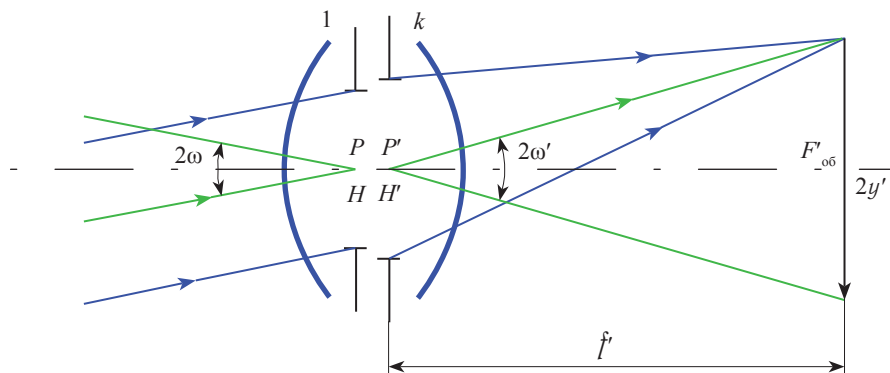


Рис. 7. ОС дальнего действия с предметом дальнего типа с изображением ближнего типа

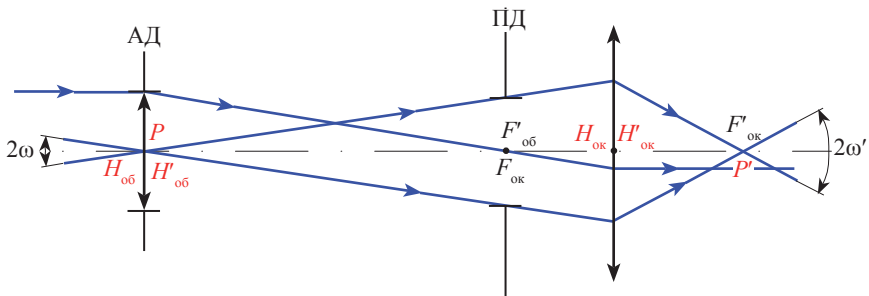


Рис. 8. Телескопическая система — система дальнего действия

ПД может иметь разнообразную форму. Центрированные ОС круговой симметрии дают изображение в виде круга, поэтому ПД в большинстве случаев имеет круглую форму, но иногда — прямоугольную (кадровое окно).

Телескопическая система — система дальнего действия (рис. 8) с предметом и изображением дальнего типа имеет угловое поле  $2\omega$  в пространстве предметов и  $2\omega'$  — в пространстве изображений. В этой системе апертурная диафрагма (АД) и входной зрачок совпадают. В техническом задании на разработку той или иной системы всегда задают поле в пространстве предметов.

ОС ближнего действия — микроскопа показан на рис. 9. Данная ОС характеризуется линейным полем  $2y$ , полем в пространстве предметов;

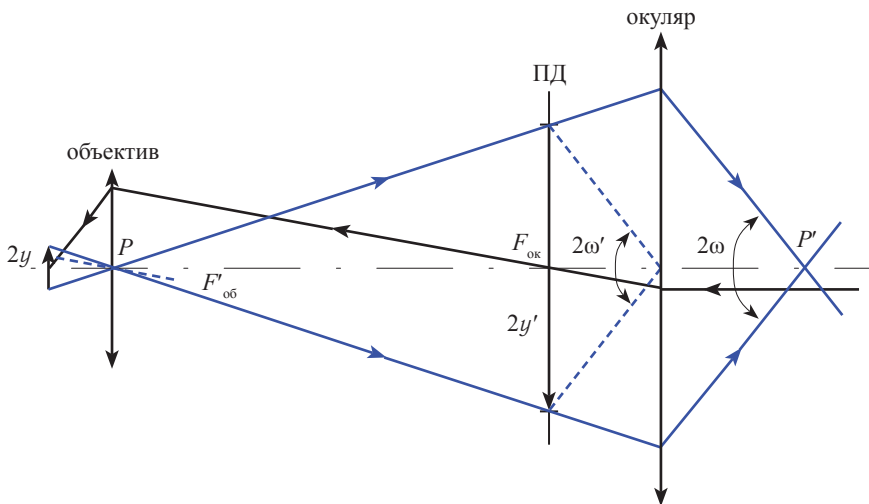


Рис. 9. ОС ближнего действия с изображением дальнего типа

$2\omega'$  — угловое поле микроскопа в пространстве изображений, которое является угловым полем окуляра.

### 2.3. Светосила и освещённость ОС

Светосила является одной из важнейших характеристик ОС и всего оптического прибора в целом [11]. Светосила характеризует способность системы концентрировать падающий свет на входной зрачок и формировать изображение достаточной яркости. Недостаточная яркость изображения препятствует возможности различать детали изображения даже при высокой разрешающей способности ОС.

ОС в геометрической оптике рассматривается как передатчик световой энергии, а светосила является характеристикой эффективности передачи световой энергии.

Светосила  $H$  определяется как отношение освещенности  $E'_v$ , полученной в плоскости изображения ОС, к яркости  $L_v$  изображаемого предмета:

$$H = \frac{E'_v}{L_v}. \quad (10)$$

Напомним отдельные важные фотометрические законы, известные из курса геометрической оптики, которые далее будут использоваться.

Яркость  $L_v$  предмета и яркость  $L'_v$  изображения связаны между собой уравнением [10, 11]:

$$L'_v = \tau_{\text{ОС}} \left( \frac{n'}{n} \right)^2 L_v. \quad (11)$$

Этот закон справедлив в том случае, когда изображение рассматривается непосредственно глазом (например, в зрительной трубе или в микроскопе) или фиксируется другим приемником без участия рассеивающего экрана. Если рассматривается изображение, создаваемое на рассеивающем экране, то его яркость следует определять по формуле

$$L'_v = \frac{\rho}{\pi} E'_v, \quad (12)$$

где  $E'_v$  — освещенность экрана;  $\rho$  — альbedo (средний по рассматриваемому диапазону спектра коэффициент отражения экрана).

Яркость несамосветящихся источников, имеющих матовую поверхность, не зависит от направления наблюдения. Такие источники называют ламбертовскими по фамилии создателя закона, закон Ламберта [1, 3]  $dI_v = L_v ds \cos \varphi = I_v \cos \varphi$ .

Световой поток, падающий на входной зрачок ОС, определяют в предположении, что в окрестности осевой точки  $A$  пространства предметов расположен элемент  $ds$  светящейся поверхности (элементарная площадка), перпендикулярной оптической оси. Этот элемент излучает световой поток, заполняющий отверстие входного зрачка. В разделе «Фотометрия» показывают, полагая площадь  $ds = \text{const}$  и яркость предмета  $L_v = \text{const}$ , что световой поток  $d\Phi$ , входящий во входной зрачок ОС [11],  $d\Phi = 4\pi L_v ds \sin^2 \frac{\sigma_A}{2}$ . Обычно, полагая  $4 \sin^2 \frac{\sigma_A}{2} = \sin^2 \sigma_A$ , принимают

$$d\Phi = \pi L_v ds \sin^2 \sigma_A. \quad (13)$$

Относительная погрешность такого приближения не превышает 10% в диапазоне углов  $\sigma_A \leq 40^\circ$ . Правда, более точным является приближение  $4 \sin^2 \frac{\sigma_A}{2} = \sigma_A^2$ , когда та же относительная погрешность 10% получается в диапазоне  $\sigma_A \leq 60^\circ$ .

Световой поток  $d\Phi'$ , выходящий из выходного зрачка ОС, можно найти из закона сохранения энергии, учтя коэффициент  $\tau$  пропускания оптической системы:

$$d\Phi' = \pi \tau L_v ds \sin^2 \sigma_A. \quad (14)$$

Для пространства изображений можно получить формулу, аналогичную (14), используя несколько иной подход и другую формулу для элементарного светового потока в пространстве предметов и тогда получаем:

$$d\Phi' = \pi \tau L' ds' \sin^2 \sigma'_A, \quad (15)$$

где  $ds'$  — элементарная площадка в пространстве изображений, сопряженная с площадкой  $ds$ ;  $\sigma'_A$  — апертурный угол в пространстве изображений.

Закон Кирхгофа [11] позволяет исключить  $L'$  из (15):

$$d\Phi' = \pi \tau \left( \frac{n'}{n} \right) L_v ds' \sin^2 \sigma'_A. \quad (16)$$

Для определения светового потока в пространстве изображений, т.е. выходящего из выходного зрачка, можно применять любую из формул (14) или (16).

Определим освещенность изображения, зная из курса геометрической оптики, что

$$E'_v = \frac{d\Phi'}{ds'} \quad (17)$$

и учитывая (14) получим

$$E'_v = \pi\tau L_v \frac{ds}{ds'} \sin^2 \sigma_A. \quad (18)$$

Элементарные площадки  $ds'$  и  $ds$  сопряжены и подобны друг другу, поэтому их отношение равно, как следует из геометрии, квадрату отношения их соответственных линейных размеров  $\frac{ds}{ds'} = \beta^2$ . С учетом этого из (18) получаем

$$E'_v = \pi\tau L_v \left( \frac{\sin \sigma_A}{\beta} \right)^2. \quad (19)$$

Если в выражение (17) ввести для  $d\Phi'$  уравнение (15), то получится

$$E'_v = \pi\tau L_v \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \sin^2 \sigma'_A. \quad (20)$$

Для расчетов можно применять каждую из формул (19) или (20).

Приравняв правые части формул (19) и (20), найдем выражение для линейного увеличения

$$\beta = \frac{n \sin \sigma_A}{n' \sin^2 \sigma'_A}, \quad (21)$$

представляющее собой известное условие (закон) синусов Аббе. Это следует рассматривать как условие применимости полученных формул для осевой освещенности плоскости изображения.

Следует обратить внимание на то, что формулы (19) и (20) справедливы в том случае, если предметы представляют собой светящиеся элементарные площадки, что было принято вначале. Однако они несправедливы, если эти предметы линейные или точечные.

Всякий предмет, наблюдаемый при помощи оптической системы, проецируется на плоскость предмета в виде двумерного

о б р а з а. Для каждой ОС существует минимальный размер предмета  $y_0$ , при котором этот предмет еще может быть отличен от г е о м е т р и - ч е с к о й точки. Если оба размера этого образа, наибольший и наименьший, б о л ь ш е  $y_0$ , предмет называем п л о щ а д о ч н ы м, или п р о т я ж е н н ы м и для него справедливы полученные выше формулы. Если одно измерение предмета больше  $y_0$ , а другое — меньше  $y_0$ , то предмет — л и н е й н ы й.

Если оба измерения предмета меньше  $y_0$ , то он — т о ч е ч н ы й.

В случае л и н е й н о г о п р е д м е т а формулы (19) и (20) должны быть заменены соответственно выражениями:

$$E'_v = \pi \tau L_v \frac{\sin^2 \sigma_A}{\beta}; \quad (22)$$

$$E'_v = \pi \tau L_v \beta \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \sin^2 \sigma'_A. \quad (23)$$

Для т о ч е ч н о г о п р е д м е т а справедливо выражение

$$E'_v = \pi \tau L_v \sin^2 \sigma_A \quad (24)$$

или, пользуясь законом синусов, заменим  $\sin^2 \sigma_A$  в (24) выражение  $\sin^2 \sigma_A = \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \beta^2 \sin^2 \sigma'_A$  и получаем

$$E'_v = \pi \tau L_v \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \beta^2 \sin^2 \sigma'_A. \quad (25)$$

Разделив полученные формулы (19)–(20), (22)–(25) освещенности изображения на  $L_v$  и постоянные множители для разных предметов, имеем выражения для светосилы ОС:

для протяженных (площадочных) предметов  $H = \sin^2 \sigma'_A$ ;

для линейных предметов  $H = \beta \sin^2 \sigma'_A$ ;

для точечных предметов  $H = \beta^2 \sin^2 \sigma'_A$ .

### **Освещенность изображения и светосила ОС с малой передней апертурой (ОС дальнего действия)**

Эти системы используются в приборах для наблюдения на дальнем расстоянии — это телескопические системы, фотографические объективы. Для определения освещенности  $E'_v$  в этих системах исполь-

зuem формулу (26) для протяженного предмета, полагая апертурный угол  $\sigma_A$  малым. В этом случае  $\sin \sigma_A \approx \text{tg } \sigma_A \approx \sigma_A$ , поэтому  $\text{tg } \sigma_A = \frac{D}{2p}$ , где  $p$  — расстояние от входного зрачка до предмета (рис. 10).

Из (19) имеем

$$E'_v = \frac{1}{4} \pi \tau L_v \left( \frac{D}{\beta_p} \right)^2. \quad (26)$$

Но в геометрической оптике доказано [11], что  $\beta_p = \frac{n}{n'} f' \frac{\beta_p - \beta}{\beta_p}$  и поэтому

$$E'_v = \frac{\pi \tau L_v}{4} \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \left( \frac{\beta_p}{\beta_p - \beta} \right)^2. \quad (27)$$

Тогда светосила  $H$  математически определяется выражением

$H = \frac{\pi \tau L_v}{4} \left( \frac{n'}{n} \right)^2 \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \left( \frac{\beta_p}{\beta_p - \beta} \right)^2$ , но с учетом постоянства многих со-  
множителей отмечают, что светосила пропорциональна квадрату от-  
носительного отверстия и записывают:

$$H = H_\Gamma = \left( \frac{D}{f'} \right)^2, \quad (28)$$

где  $H_\Gamma$  — геометрическая светосила.

Для многих фотообъективов линейное увеличение в зрачках  $\beta_p = 1$ , и формула (27) видоизменяется:

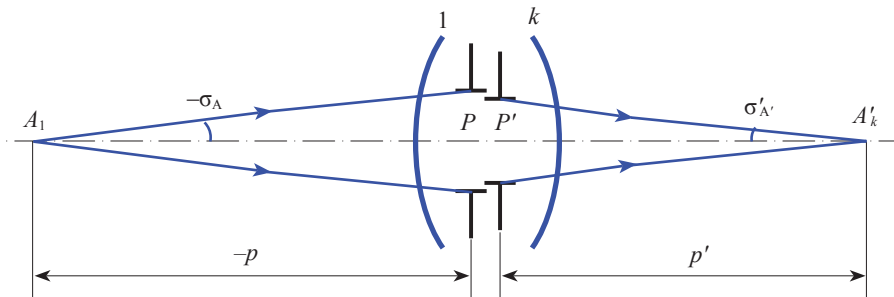


Рис. 10. К определению  $\text{tg } \sigma_A$  и  $\text{tg } \sigma'_A$ .

$$E'_v = \frac{\pi\tau L_v}{4} \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \left(\frac{1}{1-\beta}\right)^2. \quad (29)$$

Когда предмет находится так далеко от ОС, что можно расстояние до предмета считать практической бесконечностью, то линейное увеличение  $\beta \approx 0$  и из (27) и (29) имеем:

$$E'_v{}^\infty = \frac{\pi\tau L_v}{4} \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \left(\frac{D}{f'}\right)^2. \quad (30)$$

Если предмет изображается в натуральную величину ( $\beta = -1$ ), а  $\beta_p = 1$ , то освещенность изображения в 4 раза меньше, чем для предмета в бесконечности:

$$E'_v = \frac{\pi\tau L_v}{16} \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \left(\frac{D}{f'}\right)^2. \quad (31)$$

Из формул (27), (29)–(31) следует, что светосила ОС с малой передней апертурой пропорциональна квадрату относительного отверстия (28), которую называют геометрической светосилой.

Чаще всего ОС находится в воздухе, поэтому множитель  $\left(\frac{n'}{n}\right)^2 = 1$  во всех вышеприведенных формулах. Известно понятие ф и з и ч е с к о й светосилы —  $H_\phi = \tau_{ос} \left(\frac{D}{f'}\right)^2$ .

Приведенные формулы справедливы только для центральной части поля, расположенной вблизи оптической оси.

Отдельно светосила для телескопических систем (ТС) не рассматривается — целесообразно говорить о ее работе совместно с глазом, так как  $f'_{ТС} = \infty$ .

### **Освещенность изображения и светосила оптических систем с малой задней апертурой**

Подобные ОС встречаются в многочисленных приборах, проецирующих изображение на экран — кинопроекторы, эпидиаскопы, проекторы для контроля размеров мелких деталей. К приборам с ОС с малой задней апертурой можно отнести осветительные и сигнальные приборы дальнего действия (прожекторы, маяки, светофоры, системы оптической связи).



Для рассмотрения заданных характеристик воспользуемся формулами (19) и (20), полагая  $n=n'=1$  и считая угол  $\sigma'_{A'}$  малым.

С учетом принятых условий математически получим  $\frac{E'_v}{L_v} = \pi\tau(\sigma'_{A'})^2$ , но принимают

$$H = (\sigma'_{A'})^2. \quad (32)$$

Аналогично случаю с малой передней апертурой можно записать  $\sin \sigma'_{A'} \approx \text{tg } \sigma'_{A'} \approx \sigma'_{A'}$  и  $\text{tg } \sigma' = \frac{D'}{2p'}$ , где  $p'$  — расстояние от выходного зрачка до изображения. В результате имеем  $E'_v = \pi\tau L_{\text{вист}} \frac{D'^2}{4p'^2}$ , где  $\pi \frac{D'^2}{4} = S_{p'}$  — площадь выходного зрачка и получаем

$$E'_v = \tau L_{\text{вист}} \frac{S_{p'}}{p'^2} \quad (33)$$

формулу закона Чиколева–Манжена, из которой следует, что освещенность экрана пропорциональна площади  $S_{p'}$  выходного зрачка. Это утверждение справедливо только при условии, что выходной зрачок полностью заполнен светом. Если это условие не выполняется, то в  $S_{p'}$  должна входить не вся площадь зрачка, а только действующая, т.е. заполненная светом.

### Освещённость изображения $E'_\omega$ точки вне оси

Освещённость изображения  $E'_\omega$  точки вне оси, например, на краю поля, определяется по формуле

$$E'_\omega = E'_v k_\omega \cos^4 \omega',$$

где  $E'_v$  — осевая освещенность плоскости изображения (экрана), лк;  $E'_\omega$  — освещенность на краю плоскости изображения, лк;  $2\omega'$  — угловое поле объектива в пространстве изображений;  $k_\omega$  — коэффициент виньетирования,  $k_\omega = \frac{S_{\text{вх.зрачка накл.пучка}}}{S_{\text{вх.зрачка осевого пучка}}}$ .

Обычно  $k_\omega < 1$ , но если объектив широкоугольный, то часто вводится абберационное виньетирование, когда ширина наклонного пучка лучей больше осевого (рис. 11), и в этом случае  $k_\omega > 1$ .

Кроме того, благодаря введению абберационного виньетирования снижается степень косинуса в формуле для внеосевой освещённости и возможно получение зависимости  $E'_\omega = k_\omega E'_v \cos^2 \omega$ .

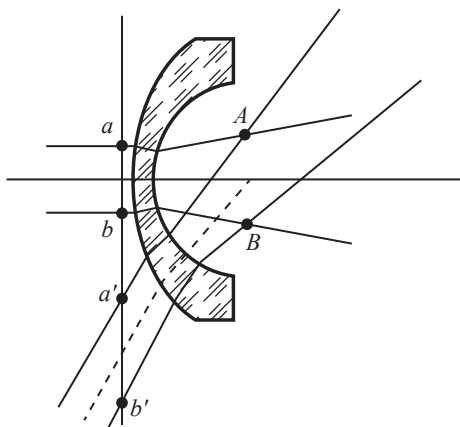


Рис. 11. Аберрационное виньетирование

Чаще всего допускается  $k_{\omega} = 0,5$  (50%).

Виньетирование обычно заметно снижает освещённость внеосевых точек, вызывая падение освещённости к краю поля. Однако введение виньетирования позволяет уменьшить световые диаметры компонентов ОС за счет уменьшения диаметра широкого наклонного пучка и поэтому уменьшить aberrации этого пучка.

Поэтому в многокомпонентных системах значительной длины, в частности, в сложных телескопических системах (ТС), например, в зрительных трубах с оборачивающими системами обычно вводится геометрическое виньетирование. В зрительных трубах с призмёнными оборачивающими системами виньетирование позволяет существенно уменьшить массу ОС благодаря уменьшению размеров призм или призмённых систем.

## 2.4. Спектральные характеристики ОС

Спектральные характеристики необходимы для согласования интервала длин волн, которые излучает предмет, и в котором образуется изображение — выбора приемника излучения (ПИ).

Обычно все расчеты хода лучей в ОС выполняют для нескольких длин волн из всего рабочего спектрального диапазона (интервала)  $\lambda_1 \dots \lambda_2$ , где  $\lambda_1 < \lambda_2$ . Основная длина волны  $\lambda_0$  является средней длиной

волны,  $\lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ . Для видимого спектрального интервала  $\lambda_0 = \lambda_e$ ,

$\lambda_1 = \lambda_{F'}$ ,  $\lambda_2 = \lambda_{C'}$ . ( $\lambda_e = 0,54607$  мкм,  $\lambda_{F'} = 0,4799$  мкм,  $\lambda_{C'} = 0,6438$  мкм).

Основной длиной волны является  $\lambda_0 = \lambda_e$  (ГОСТ 50314–92 «Предпочтительные длины волн») — это средняя длина волны видимого диапазона спектра  $F' \dots C'$ .

На рис. 12 показан видимый спектр и кривая спектральной чувствительности глаза.

В оптической системе происходят потери света за счет его поглощения оптическими материалами и отражения на поверхностях. Функция относительного спектрального пропускания  $\tau(\lambda)$  показывает, какое количество света (светового потока) пропускает ОС по отношению к падающему потоку  $\Phi$  в зависимости от длины волны и по отношению к основной длине волны  $\lambda_0$ . Излучение разных длин волн  $\lambda$  по-разному поглощается и отражается в ОС.

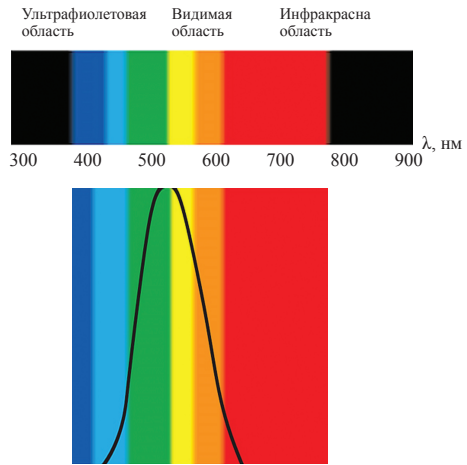


Рис. 12. Видимый спектр и кривая спектральной чувствительности глаза

**Длины волн излучения видимого диапазона спектра и соответствующие им цвета и частоты**

Цвет	Диапазон		
	Длина волны, нм	Частота, ТГц	Энергии фотонов, эВ
Красный	625–740	480–405	1,68–1,98
Оранжевый	590–625	510–480	1,98–2,10
Желтый	565–590	530–510	2,10–2,19
Зеленый	500–565	600–530	2,19–2,48
Голубой	485–500	620–600	2,48–2,56
Синий	440–485	440–485	440–485
Фиолетовый	380–440	790–680	2,82–3,26

## РАЗДЕЛ 3

# КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ

### 3.1. Кружок Эри и его определение

Каждая ОС должна формировать изображение, подобное предмету не только по общему контуру, но и в каждой его точке, т.е. строить изображение определённого качества.

Чтобы оценить качество изображения, его надо охарактеризовать как с качественной, так и с количественной сторон.

С давних времён наиболее распространённым критерием оценки качества изображения является разрешающая способность (РС), т.е. способность ОС разделять изображения двух весьма близко расположенных точек.

Разрешающая способность  $R$  имеет количественный критерий оценки качества изображения.

Наличие аберраций приводит к тому, что любая точка предмета изображается в виде пятна (кружка) рассеяния  $2\Delta y'$  определённого размера (диаметра). Размер  $2\Delta y'$  кружка даёт некоторое представление о качестве изображения, так как величина  $1/(2\Delta y')$  в какой-то приближённой мере определяет линейный предел разрешения, оценивающий разрешающую способность ОС [1].

Однако, как бы хорошо ни была исправлена аберрация, ОС никогда не даст идеального точечного изображения, так как аберрации являются геометрическими и при расчёте не учитываются дифракция. Причиной является дифракция Фраунгофера на круглом отверстии, которую не учитывает геометрическая оптика.

Из-за дифракции Фраунгофера даже безаберрационная ОС даёт изображение в виде дифракционного кружка малых, но конечных размеров — кружка (диска) Эри (Airy):

$$r' = \Delta y' = \frac{1,22\lambda f'_{OC}}{D}. \quad (34)$$

Покажем, как получается формула (34).

Для этого вначале рассмотрим распределение освещённости в дифракционном пятне рассеяния в случае свободной от aberrаций ОС, которое можно математически рассчитать на основании принципа Гюйгенса. Пусть из выходного зрачка ОС выходит строго гомоцентрический пучок лучей, сходящихся в точке  $A'_k$  (рис. 13) и заполняющих небольшой апертурный угол  $\sigma'_A$ . В пределах этого пучка лучей выберем произвольную волновую поверхность  $W'$ , достаточно далёкую от точки  $A'_k$ . Она представляет собой сферическую поверхность с центром в точке  $A'_k$ .

По принципу Гюйгенса мы представляем себе волновую поверхность  $W'$  как бы покрытой источниками когерентного излучения.

Распределение освещённости в окрестности точки  $A'_k$  на плоскости изображения представляется как результат интерференции света, излучаемого этими источниками. Соответствующий расчёт приводится в курсе физической оптики.

Распределение освещённости в дифракционном изображении точки определяется с использованием функции Бесселя первого рода первого порядка  $J_1(x)$ .

$$E'_v = E'_{v_0} \left[ \frac{2J_1(x)}{x} \right]^2, \quad (35)$$

где  $E'_{v_0}$  — осевая освещённость изображения в точке  $A'_k$  (см. рис. 13) — в центре кружка рассеяния;  $E'_v$  — освещённость изображения

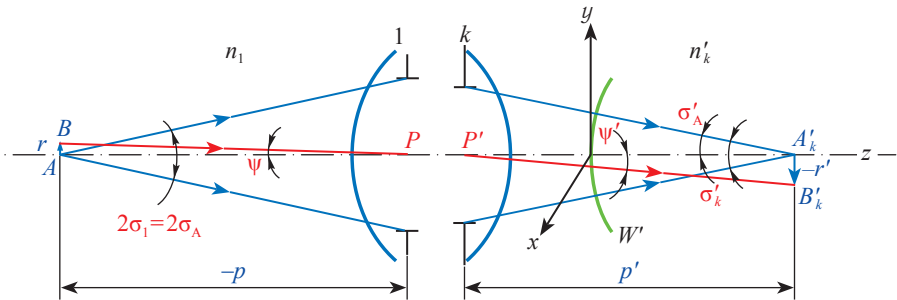


Рис. 13. Образование дифракционного кружка рассеяния радиусом  $r'$  безабберационной оптической системой

в точке  $B'_k$ , расположенной на рисунке на расстоянии  $r'$  от точки  $A'_k$ ;  $J_1(x)$  — функция Бесселя,  $x$  — аргумент;  $x$  — безразмерная величина, выражает отрезок  $r' = A'_k B'_k$  в оптических единицах.

Такие единицы удобно применять, так как величина  $x$ , выраженная в этих единицах, сохраняет постоянное численное значение во всех промежуточных средах, в пространствах предмета и изображения, так как  $n'_k \sigma'_k r' = n_1 \sigma_1 r_1 = I$  — инвариант Лагранжа–Гельмгольца.

Распределение освещённости вокруг точки  $A'_k$  в плоскости изображения является результатом интерференции дифрагированных лучей.

**Результаты расчета распределения освещенности в дифракционном пятне, выполненные впервые в 1834 г. Дж. Эри [1]**

$x$	$E'_v/E'_{v0}, \%$	$x$	$E'_v/E'_{v0}, \%$	Примечания
0,0	100,00	3,3000	1,79	
0,5	93,91	3,5000	0,62	—
1,0	77,46	3,8317	0,00	Минимум
1,5	55,34	5,1356	1,75	Максимум
2,0	33,26	7,0156	0,00	Минимум
2,5	15,81	8,4172	0,42	Максимум
3,0	5,11	10,1735	0,00	Минимум
3,2	2,67	11,6200	0,16	Максимум

Для первого тёмного кольца в кружке Эри  $x=3,8317$  и вычисляется по формуле

$$x = \frac{2\pi}{\lambda} n'_k \sin \sigma'_k r'$$

Найдём радиус  $r'$  кружка Эри:

$$r' = \frac{\lambda x}{2\pi n'_k \sin \sigma'_k}, \quad (36)$$

где  $\sin \sigma'_k = \sigma'_k$ , так как  $\sigma'_k$  имеет малое значение, поэтому

$$r' = \frac{\lambda x}{2\pi n'_k \sigma'_k}. \quad (37)$$

Если предмет расположен в бесконечности ( $s_1 = -\infty$ , рис. 14), то

$$\sigma'_k = \frac{m}{f'} = \frac{D}{2f'}.$$

В результате получаем для радиуса кружка Эри формулу

$$r'_3 = \frac{\lambda x f'}{\pi n'_k D}. \quad (38)$$

Если  $n'_k = 1, s_1 = -\infty, x = 3,8317$ , то

$$r'_3 = \frac{1,22\lambda}{D} f'; \quad (39)$$

Для  $s_1 \neq -\infty$

$$r'_3 = \frac{0,61\lambda}{\sin \sigma'}. \quad (40)$$

В угловой мере значение  $r'_3$  для  $s_1 = -\infty$  можно определить так:

$$\Psi'' = \frac{r'_3}{f'} \rho'' = \frac{1,22\lambda}{D} \rho'', \quad (41)$$

где  $\lambda$  и  $D$  в мм,  $\rho'' = 206265$ .

Найдем в пространстве предметов радиус кружка  $r$ , которому в пространстве изображений соответствует радиус  $r'$ . Зная, что  $n'_k \sigma'_k r' = n_1 \sigma_1 r$ , получим

$$r = \frac{\lambda x}{2\pi n_1 \sigma_1} = \frac{\lambda x}{2\pi n_1 \sigma_A}. \quad (42)$$

Из рис. 13, на котором условно представлена безаберрационная система, видно, что  $\sigma_1 = \sigma_A = D/(2p)$ , поэтому

$$r = -\psi_p. \quad (43)$$

Приравняв (42) и (43), опустив знак «минус», имеем

$$\Psi = \frac{\lambda x}{\pi n_1 D}. \quad (44)$$

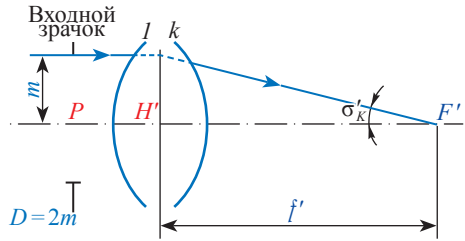


Рис. 14. Иллюстрация к определению  $\sigma'_k$  в ОС в случае предмета в бесконечности

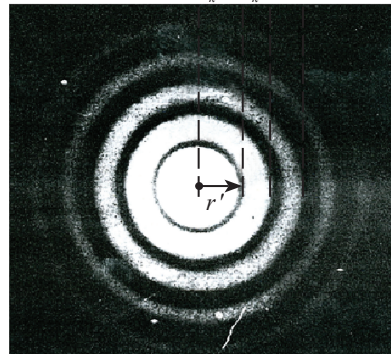
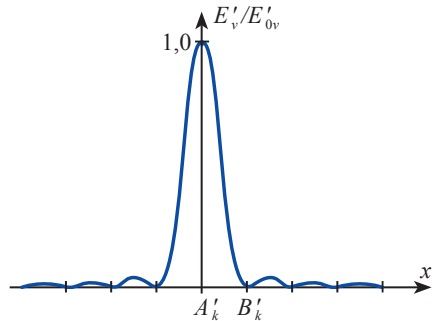


Рис. 15. Распределение освещённости в дифракционном изображении  $A'_k$  осевой точки

Подставив  $x=3,8317$ , получим из (42) и (44)

$$r = \frac{0,61\lambda}{n_1\sigma_A} = \frac{0,61\lambda}{A}; \quad (45)$$

$$\Psi = \frac{1,22\lambda}{n_1D}. \quad (46)$$

Формулы (45) и (46), полученные после преобразования формул (40) и (39), определяют соответственно линейную и угловую величину в пространстве предметов, которая соответствует радиусу кружка Эри в пространстве изображений. Чаще всего ОС находится в воздухе, поэтому  $n_1 = n'_k = 1$ .

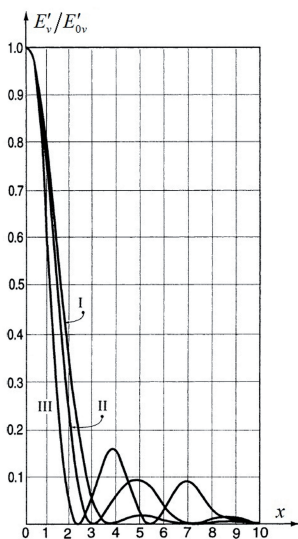
Полученные соотношения справедливы для систем со сплошным круглым зрачком. Достаточно большой класс составляют зеркальные и зеркально-линзовые системы, имеющие центральное экранирование и поэтому кольцевую форму зрачка. Для них распределение освещенности в дифракционном пятне

рассеяния можно рассчитать по формуле [1],

$$E'_v = \frac{E'_{v0}}{(1-k_s^2)^2} \left[ \frac{2J_1(x)}{x} - k_s^2 \frac{2J_1(x_1)}{x_1} \right]^2,$$

где  $x_1 = k_s x$ ;  $k_s = D_1 / D$ ;  $E'_{v0}$  — освещенность в центре фигуры рассеяния;  $D_1$  — диаметр центральной экранированной части входного зрачка.

При расчете распределения освещенности при различных значениях  $k$  обнаруживается, что при значениях  $k_s \leq 0,25$  максимум освещенности в кружке Эри становится более «острым», благодаря чему кружок уменьшается. Это благоприятно для четкости изображения, несмотря на то, что высота максимумов в кольцах несколько увеличивается. При



**Рис. 16.** Распределение освещенности в дифракционном изображении точки в плоскости геометрического фокуса при различных величинах центрального экранирования  $k_s$ :

*I* —  $k_s=0,000$ ; *II* —  $k_s=0,250$ ; *III* —  $k_s=0,707$ .

Кривые нормированы так, что в точке  $x=0$  освещенности принята за единицу



$k_3 = 0,30$  степень резкости изображения еще незначительно отличается от случая незранированного сплошного зрачка. Только при  $k_3 = 0,40$  наблюдается заметное, но во многих случаях допустимое ухудшение качества изображения.

Как известно, оптические системы с центральным экранированием применяются в качестве астрономических, фотографических объективов и объективов микроскопов.

### 3.2. Влияние aberrаций и формы апертурной диафрагмы на распределение освещенности в дифракционном изображении точки (на ФРТ)

Характер распределения освещенности в изображении точки или, как говорят, форму пятна рассеяния, определяют только характеристики оптической системы.

На рис. 17, а представлено распределение освещенности в дифракционном изображении светящейся точки, сформированное безабберационной оптической системой с апертурной диафрагмой круглой формы. Это изображение точечного источника также называют дифракционной картиной Эри, а центральную область до первого минимума — кружком, или диском Эри [13].

Распределение освещенности в дифракционном изображении точки, полученное с помощью оптической системы с квадратной апертурной диафрагмой, представлено на рис. 17, б.

Существенное влияние на распределение освещенности оказывают неравномерность пропускания и aberrации оптической системы. На рис. 17, в представлено пятно рассеяния оптической системы с экспоненциальным падением

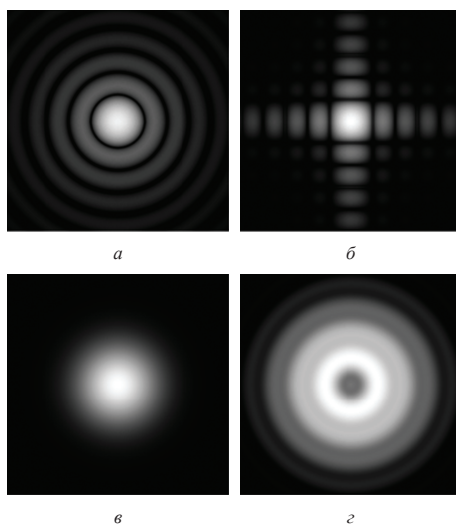
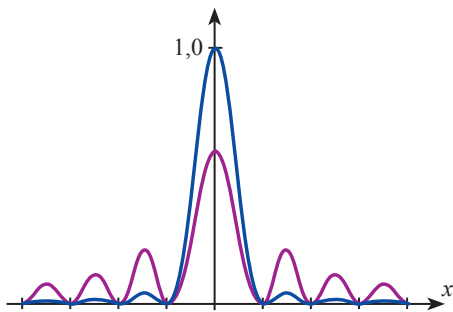


Рис. 17. Изображение светящейся точки, создаваемое различными оптическими системами



**Рис. 18.** Влияние aberrаций на распределение освещенности в дифракционном изображении точки (ФРТ)

функции амплитудного пропускания  $\tau(\rho_x, \rho_y)$ .

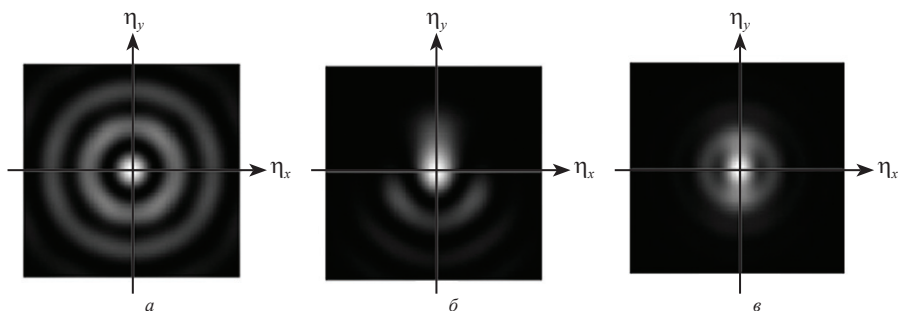
Распределение освещенности в изображении, сформированное оптической системой при наличии расфокусировки, представлено на рис. 17, *з*. Таким образом, характерное изменение пятна рассеяния позволяет использовать ФРТ для анализа свойств и качества оптической системы.

Влияние малых aberrаций (волновая aberrация составляет доли длины волны) на распределение освещенности в дифракционном изображении точки (ФРТ) проявляется в том, что часть энергии из центрального максимума переходит в кольца. В результате в центральном максимуме остается около 60–70% вместо 84%, а размеры центрального максимума сохраняются, но освещенность в центре уменьшается (рис. 18).

Aberrации разных типов по-разному влияют на вид пятна рассеяния (картину Эри). В случае симметричных aberrаций (сферическая, расфокусировка) сохраняется радиальная симметрия пятна (рис. 19, *а*).

В случае несимметричных aberrаций (кома, астигматизм) симметрия пятна нарушается (см. рис. 19, *б*, см. рис. 19, *в*).

При дальнейшем увеличении aberrаций сходство ФРТ с безaberrационной полностью теряется, и ее форма определяется картиной по-



**Рис. 19.** Картины Эри для aberrаций разных типов:

*а* — симметричные aberrации; *б* — кома; *в* — астигматизм

перечных aberrаций (точечной диаграммой). Практически вся энергия из центрального максимума перекачивается в кольца, а в центральном максимуме остается меньше 40% энергии. Однако при этом сохраняется фигура (узор) дифракционного пятна с шагом 0,5 в канонических координатах.

### 3.3. Разрешающая способность и критерии ее оценки

Разрешающая способность — свойство ОС давать раздельными изображения двух близко расположенных точек (точечных предметов).

Разрешающая способность оценивается величиной предела разрешения, т.е. минимальным расстоянием между двумя близко расположенными точками, при котором они изображаются раздельно.

Если две светящиеся точки расположены близко друг от друга, то их дифракционные изображения могут накладываться одно на другое, а освещённость в местах наложения суммироваться. На рис. 20 приведены фотографии дифракционных изображений двух точек: сверху — когда две точки ещё изображаются раздельно и расстояние между ними равно радиусу дифракционного кружка, а внизу показан тот случай, когда дифракционные изображения двух близкорасположенных точек сливаются друг с другом и расстояние между ними меньше линейного предела разрешения.

Чтобы эти две точки были видны раздельно, необходимо, чтобы расстояние между дифракционными максимумами было равно радиусу  $r'_1$  первого тёмного кольца.

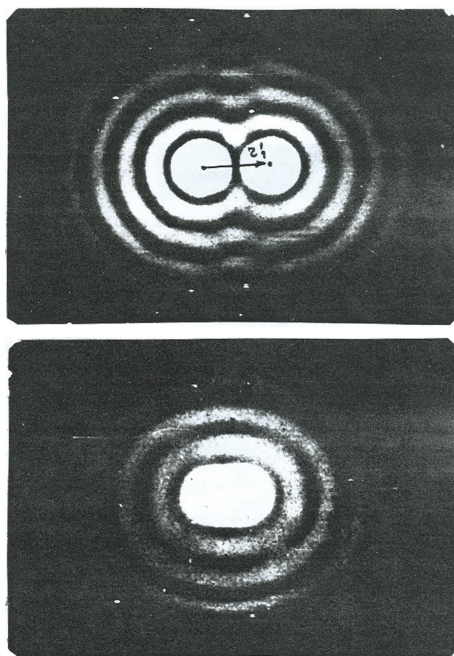


Рис. 20. Дифракционные изображения двух точек

Следовательно, чтобы две точки были видны раздельно, необходимо, чтобы дифракционный максимум ( $E'_{2\max}$ ) второй точки совпал с минимумом ( $E'_{1\min}$ ) первого тёмного кольца первой точки (рис. 21).

Для разрешения двух точек необходимо, чтобы разность между максимальной и минимальной освещённостями в суммарной дифракционной картине достигала некоторого значения (рис. 21). Принято, что при  $E'_v/E'_{v0} \leq 0,8$  ОС различает обе точки, когда контраст  $\approx 20\%$ , что и показано ниже на рис. 21. Это — критерий разрешающей способности по Релею (1879 г.) [1, 11, 13].

Для получения формулы углового предела разрешения применим полученную формулу (41) для видимого диапазона спектра, взяв  $\lambda = 0,000546 \text{ мм} = 546 \cdot 10^{-6} \text{ мм}$  и  $\rho'' = 206265$ .

После подстановок в (20), т.е.  $\Psi'' = \frac{r'_3}{f'} \rho'' = \frac{1,22\lambda}{D} \rho''$ , получаем  $\Psi = 140''/D$  — формулу углового предела разрешения по Релею при контрасте 20%, по которой оценивается разрешающая способность при  $s_1 = -\infty$ ,

например, для объективов ТС (телескопических систем).

Тренированный глаз способен различать две светящиеся точки, если  $E'_{\min}$  в промежутке между двумя максимумами будет отличаться от  $E'_{\max}$  на 5%, т.е.  $x_1 = 3,3$  и поэтому  $\Psi = 1,0504\lambda/D$ .

Тогда для  $\lambda = \lambda_c$  получим  $\Psi = 120''/D$  — практически (астрономический) критерий, угловой предел разрешения высококачественных объективов телескопических систем.

В этом случае расстояние между максимумами освещёностей для двух точек составляет  $0,85 r'_3$ , а не  $r'_3$ , как было принято по критерию Релея.

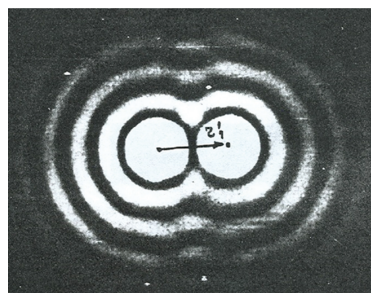
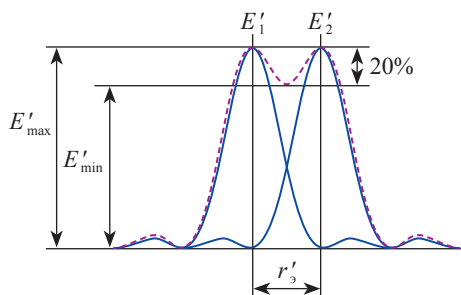


Рис. 21. Распределение освещённости в дифракционном изображении двух близко расположенных точек, в соответствии с критерием Релея для РС

Для не визуальных ОС абсолютный критерий разрешающей способности — угловой предел разрешения  $\Psi = 108''/D$ , соответствующий  $x_1 = 3,0$ .

При оценке разрешающей способности надо принять во внимание погрешности изготовления, сборки и юстировки. Поэтому практически всегда рекомендуется использовать формулу  $\Psi = 140''/D$ .

Зависимость  $\Psi = 120''/D$  справедлива для уникальных и дорогостоящих астрообъективов, высококачественных объективов телескопических систем.

В таблицу сведены угловые пределы разрешения ОС.

**Угловой предел разрешения ОС для  $\lambda = 0,546$  мкм**

Формула $\Psi$	Название критерия РС	$x_1$	Контраст, %
$\Psi = 140''/D$	Критерий по Релею	3,8317	20
$\Psi = 120''/D$	Практический (астрономический) критерий	3,3	5
$\Psi = 108''/D$	Абсолютный критерий РС (Для не визуальных ОС)	3,0	—

РС оценивается угловым пределом разрешения  $\Psi$  в угловых секундах или минутах для следующих систем:

объективов телескопических систем;

ОС спектральных приборов.

В линейной мере, линейным пределом разрешения, в микрометрах (мкм) или  $R$  в  $\text{мм}^{-1}$  РС оценивается для:

фотообъективов (в  $\text{мм}^{-1}$ ):

объективов микроскопов (в мкм).

Визуальная разрешающая способность безабберационного фотообъектива оценивается линейным пределом разрешения в  $\text{мм}^{-1}$  определяемым для  $\lambda = 0,546$  мкм по формуле:

$$R = \frac{1}{r'} = \frac{D}{1,22 \cdot 0,546 \cdot 10^{-5} f'} = \frac{1501D}{f'}, \text{ т.е. } R = \frac{1501D}{f'} = \frac{1501}{K} \text{ (мм}^{-1}\text{)}.$$

Величина  $R$  показывает, сколько линий или предметных точек фотообъектив может изобразить раздельно на отрезке длиной один миллиметр.

Фотографическая разрешающая способность  $R_\phi$  связана с разрешающей способностью фотослоя  $R_{\phi c}$  и объектива  $R_{об}$  приближенной зависимостью  $\frac{1}{R_\phi} = \frac{1}{R_{об}} + \frac{1}{R_{\phi c}}$ , где  $R$  соответствующий

линейный предел разрешения в  $\text{мм}^{-1}$ .

Для микроскопов линейный предел разрешения  $\delta$  для косо́го освещения рассчитывается по формуле  $\delta = \lambda / (2A)$  мкм.

Разрешающая способность не является полноценным критерием оценки качества изображения, особенно при значительных остаточных aberrациях. Этот критерий даёт представление о том, насколько реальная система отличается от безабберационной, но не позволяет качественно оценить изображение. Кроме того, измерение предела разрешения осложняется выбором испытательной таблицы (миры), её освещённостью, контрастом, и содержит субъективные ошибки при расшифровке.

ОС с одинаковым пределом разрешения не обеспечивают одно и то же качество изображения, они будут отличаться как по контрасту, так и по фону.

### 3.4. Волновые критерии оценки качества изображения

#### Критерии Релея и Рождественского

Для более полной характеристики качества изображения ОС надо знать кроме геометрических aberrаций, кроме разрешающей способности ещё и распределение освещённости внутри пятна рассеяния, зависящее от волновых aberrаций  $N$  ( $N/\lambda$ ) [1, 3, 13].

Один из давно известных волновых критериев — критерий Релея: для получения изображения, которое практически не отличается бы от идеального, волновая aberrация  $N$  не должна превышать  $\lambda/4$ :  $N < \lambda/4$ .

Однако для некоторых ОС, например, микроскопов, у которых линейное поле  $2y$  мало и вполне достаточно исправить хроматизм положения, сферическую aberrацию и меридиональную кому  $K$ , чтобы получить хорошее качество изображения, соблюдение критерия Релея  $N = \lambda/4$  недостаточно. К таким ОС надо применять критерий Д.С. Рождественского  $N = \lambda/10$ .

#### Наибольшие отклонения или деформация $\Delta W_{\max}$ волнового фронта

В конце 40–х – начале 50–х годов XX в. были разработаны новые волновые критерии, получившие большое распространение при расчёте ОС и оценке качества изображения.

Величина  $\Delta W_{\max}$  (рис. 22) характеризуется алгебраической суммой наибольших отклонений волнового фронта  $W$  от сферы сравнения  $R_W$ . Следует помнить, что критерий Релея успешно применяется в тех случаях, когда график волновой aberrации имеет плавный вид (дефокусировка, сферическая aberrация третьего порядка).

Если волновая aberrация меняется по сложному закону, то распределение освещённости в осевой точке (функция рассеяния точки ФРТ) может быть существенно искажено.

Качество изображения зависит не только от величины  $\Delta W_{\max}$ , но и от формы волнового фронта, от его местных деформаций, их расположения. Для учёта этих особенностей удобно применять критерий среднеквадратической деформации, или среднеквадратического отклонения волнового фронта.

### Среднеквадратическое отклонение $W_{\text{скв}}$ монохроматического волнового фронта

Этот критерий был предложен А. Маршалем в 1947 г. [14]. Рассмотрим геометрический смысл среднеквадратического отклонения  $W_{\text{скв}}$ . Пусть в ОС выбрана сфера сравнения  $R_W$  (см. рис. 22), относительно которой волновая aberrация равна  $W$ . Введём новую сферу сравнения  $R'_W$ , относительно которой волновую aberrацию обозначим через  $W'$ . При этом разность  $R_W - R'_W = \Delta W_0$  — постоянная величина. Тогда получим

$$\bar{W}^2 - (\bar{W})^2 = \bar{W}'^2 - (\bar{W}')^2.$$

Подберём сферу сравнения  $R'_W$ , так, чтобы среднеарифметическое значение волновой aberrации  $\bar{W}' = \frac{1}{S} \iint W' ds = 0$ , где  $S$  — площадь выходящего зрачка, тогда  $\bar{W}'^2 = W_{\text{скв}}^2 = \bar{W}^2 - (\bar{W})^2$ .

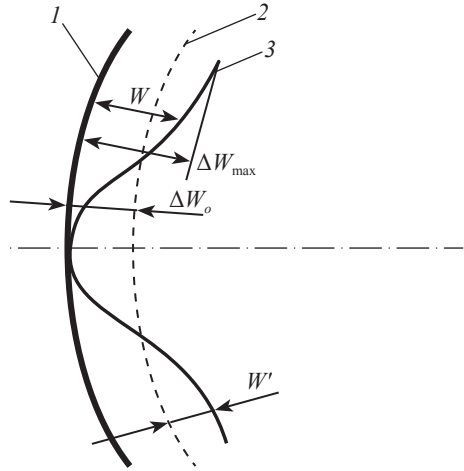


Рис. 22. К определению среднеквадратического отклонения волнового фронта:  
1 — сфера сравнения  $R_W$ ; 2 — новая сфера сравнения  $R'_W$ ;  
3 — волновой фронт  $W$

Величину  $W_{\text{СКВ}}$  можно вычислить двумя способами.

Первый способ:

$$W_{\text{СКВ}} = [\overline{(W - \bar{W})^2}]^{0,5} = \left[ \iint_S (W - \bar{W})^2 ds \right]^{0,5} = [\bar{W}^2 - (\bar{W})^2]^{0,5}, \quad (47)$$

где волновая aberrация  $W$  определяется относительно сферы сравнения  $R_{\mathcal{W}}$ .

Монохроматическую среднеквадратическую волновую aberrацию можно найти вторым способом по формуле:

$$W_{\text{СКВ}} = W' = \left[ \frac{1}{\pi^2} \int_0^1 \int_0^{2\pi} W'^2 \rho d\rho d\phi \right]^{0,5}, \quad (48)$$

где  $W'$  определяется относительно оптимальной сферы сравнения  $R'_{\mathcal{W}}$ .

### Критерий Марешаля

В случае малых aberrаций освещённость в центре дифракционного пятна рассеяния можно выразить через квадрат среднеквадратической волновой aberrации  $W_{\text{СКВ}}^2$ . Для нормированной освещённости, когда в центре дифракционного пятна освещённость равна единице, получим известную формулу Марешаля:

$$E'_{\text{v0 норм}} = 1 - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 W_{\text{СКВ}}^2. \quad (49)$$

Для безaberrационной системы  $E'_{\text{v0 норм}} = 1$ . При наличии aberrаций освещённость уменьшается на величину, пропорциональную  $W_{\text{СКВ}}^2$ . Приближённая формула достаточно точна, погрешность составляет 1...2%, если относительная освещённость не менее 0,75.

Если принять, что волновая aberrация понижает освещённость в центре дифракционного пятна рассеяния на 20%, что почти не влияет на качество изображения, то получим известный критерий Марешаля [14]

$$W_{\text{СКВ}}^2 < \lambda^2/196, \quad W_{\text{СКВ}} < \lambda/14. \quad (50)$$

Это означает, что среднеквадратическое отклонение волнового фронта относительно оптимальной сферы (сферы сравнения, см. рис. 22) не должно превышать  $\lambda/14$ .



## Полихроматическое среднеквадратическое отклонение волнового фронта $W_{\Sigma_{\text{СКВ}}}$

Полихроматическую среднеквадратическую волновую aberrацию можно определить интегрированием по спектральному интервалу монохроматического волнового фронта  $W_{\text{СКВ}}$ :

$$W_{\Sigma_{\text{СКВ}}} = \left[ \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 W'^2(\rho, \varphi, \chi) \rho d\rho d\varphi d\chi - \frac{1}{\pi^2} \left[ \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 W(\rho, \varphi, \chi) \rho d\rho d\varphi d\chi \right]^2 \right]^{0,5},$$

где вместо длины волны  $\lambda$  введена безразмерная относительная спектральная координата  $\chi$ , изменяющаяся от  $-1$  до  $+1$ , причём  $\chi = (\lambda_1 - \lambda_0) / \Delta\lambda$ , где  $\Delta\lambda = 0,5(\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}})$  — полуширина рабочего спектрального интервала;  $\lambda_0 = 0,5(\lambda_{\text{max}} + \lambda_{\text{min}})$  — средняя длина волны. При расчёте предполагается, что функция спектральной эффективности постоянна во всём спектральном интервале.

Критерии Релея, Рождественского, Марешаля указывают пределы волновых aberrаций  $N$ , при которых изображения являются совершенными, но они не характеризуют качество изображения, так как не дают представления о передаче контраста, о том, как изображаются системой элементы предмета различной величины. Они непригодны для ОС с большими остаточными aberrациями.

### 3.5. Критерий Штреля

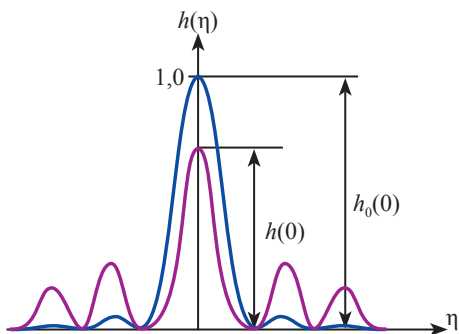
При малых значениях сферической aberrации ОС в качестве критерия оценки качества изображения используют критерий Штреля, или число  $S$  Штреля.

Критерий Штреля оценивает отношение освещённостей в центре кружка рассеяния, образуемого на оптической оси реальной системой и идеальной (в центре кружка Эри) с тем же значением фокусного расстояния:

$$S = \frac{\bar{E}'_{v0}}{E'_{v0}} = 0,8,$$

что соответствует  $N = \lambda/4$ .

Число  $S$  Штрель назвал определятельной яркостью. Оптическую систему можно считать совершенной, если  $S = 0,8$ .



**Рис. 23. Влияние aberrаций на критерий Штреля**

Этот критерий оценивает качество изображения только осевой точки, но с учётом контраста. С возрастанием сферической aberrации происходит перераспределение освещённости в пятне рассеяния (рис. 23), увеличивается освещённость боковых колец за счёт её уменьшения в центральном пятне, распределение освещённости не имеет чётко выраженного максимума, и применение

критерия Штреля теряет смысл.

Обычно рекомендуется использовать критерий Штреля в тех случаях, когда его значение мало отличается от 0,8, т.е. когда  $S=0,7\dots 0,8$ .

### 3.6. Классификация ОС по значениям волновых aberrаций

По качеству изображения, оцениваемому по волновым aberrациям, оптические системы можно разделить на две группы:

1. Дифракционно–ограниченные ОС;
2. Геометрически–ограниченные ОС.

К первой группе относятся ОС с высоким качеством изображения, волновые aberrации  $N$  которых не более  $(1\dots 2)\lambda$ . В этих случаях дифракция оказывает влияние на распределение энергии в изображении. Расчет распределения энергии в пятне рассеяния выполняется на основании принципа Гюйгенса–Френеля.

К этой группе относятся:

- визуальные телескопические системы (объективы телескопов, объективы геодезических зрительных труб);
- объективы микроскопов (микрообъективы);
- высококачественные фотообъективы;
- объективы фотолитографические, предназначенные для микроэлектронного производства.

Ко второй группе ОС, имеющих более низкое качество изображения,  $N \geq 3\dots 5\lambda$ , относятся системы, в которых распределение энергии

в изображении точки и малой светящейся площадки полностью определяется геометрическими aberrациями, а не дифракцией. К этим ОС относятся:

кино-, фото- и телевизионные объективы;

проекционные объективы;

ОС оптико-электронных приборов.

Если в первой группе большая часть объективов имеет небольшое поле, то во второй — в большинстве случаев они имеют большие угловые поля (от 40 до 120°).

### **3.7. Распределение освещённости в изображении точки на оси в случае сферической aberrации и недостатков изготовления и сборки [15]**

Если ОС имеет сферическую aberrацию, то лучи, идущие из какой-нибудь точки на оси, не образуют гомоцентрического пучка. С точки зрения волновой теории света это значит, что нормали к поверхности волны, вышедшей из системы, не пересекаются в одной точке, т.е. поверхность волны в этом случае не есть сфера.

Распределение энергии в плоскости гауссова изображения или в близких к ней плоскостях сечения пучка может быть вычислено тем же способом, как в случае безaberrационного изображения. Ход расчета значительно усложняется тем обстоятельством, что разности фаз колебаний, приходящих в рассматриваемую точку сечения пучка от различных элементов поверхности волны, выражаются более сложными формулами, чем формулы в случае сферической волны. В частности, для несферической волны нельзя найти на оси такую точку, в которой колебания, приходящие к ней из различных точек поверхности волны, имели бы одинаковые фазы. Вследствие этого интегралы, определяющие амплитуду колебаний в какой-нибудь точке сечения пучка, выражаются более сложными формулами.

Распределение освещённости в различных сечениях пучка гауссовой плоскостью и соседними с ней плоскостями имеют тот же характер, как и при отсутствии aberrации, т.е. световое пятно по-прежнему состоит из центрального яркого кружка и ряда светлых колец, окружающих центральную часть, с тёмными промежутками.

Однако величины освещённостей в похожих картинах распределения различны в обоих случаях: чем больше сферическая aberrация

пучка, тем меньше освещённость в центральном кружке и тем менее резко падает эта освещённость к краям кружка. Радиусы окружностей с минимальными значениями освещённостей мало изменяются при увеличении абберации, несколько уменьшаясь при больших абберациях. Однако при этом минимальная освещённость не равна нулю. Тёмные кольца получают больше света, равным образом освещённость светлых колец также возрастает, т.е. световая энергия перераспределяется, переходя из центрального кружка в кольца высших порядков.

Распределение энергии по кольцам зависит от остаточной сферической абберации системы. При очень больших значениях сферической абберации минимальные значения освещённостей настолько возрастают, что кружок кажется почти равномерно освещённым. Изображение точки заменяется пятном значительных размеров, т.е. делается расплывчатым и неясным.

Вычисление распределения освещённостей в различных сечениях пучка плоскостями, перпендикулярными оптической оси системы, даёт возможность выбрать из них такое, в котором освещённость в центре имеет наибольшее значение. Эту плоскость можно считать плоскостью наилучшей установки, или плоскостью изображения точки. Она не совпадает с гауссовой плоскостью изображения параксиальными лучами, а также не совпадает с плоскостью наименьшего сечения геометрического пучка лучей, называемого плоскостью наименьшего кружка рассеяния.

Изучение распределения освещённостей в плоскости изображения точки и в близких к этой плоскости сечениях пучка при помощи лупы большого увеличения или микроскопа с малым увеличением является одним из лучших и наглядных методов для оценки качества оптических систем.

Прежде всего, центральное пятно изображения и дифракционные кольца должны быть круглыми. Всякое отступление от круговой формы указывает на нарушение осевой симметрии в центрированной оптической системе, вызванное неправильностями преломляющих поверхностей, неоднородностью стекла, неправильной центрировкой линз и плохой сборкой. Хороший объектив даёт изображение в виде кружка Эри, представленного фигурой 2 в группе А на рис. 24: резко очерченное яркое центральное пятно, также резко очерченное, но гораздо менее яркое первое светлое кольцо и слабо освещённое второе, иногда третье кольцо.

Фигуры 1 и 3 получаются в близких к первому сечениях по обе стороны плоскости изображения. Фигура 4 с большим числом колец получается при большом удалении от плоскости изображения.

Группа B даёт картины, наблюдаемые в случае системы с неисправленной на краю сферической aberrацией, т.е. в случае кривой, представленной на рис. 25, где показано недоисправление aberrации, или в подобном же случае переисправления.

Сферическая aberrация переисправлена, если при удалении микроскопа от плоскости изображения появляются фигуры 2 с очень ярким и резко очерченным внешним кольцом, и если при приближении к системе наблюдается ослабление освещённости и размытость того же внешнего кольца, как у обеих фигур 1 (см. рис. 24).

Группа C соответствует обычным кривым сферической aberrации с исправлением aberrации для какого-либо луча и с остаточными aberrациями для остальных лучей. В этих случаях освещённости колец распределяются, не следуя порядку их номеров. Очень яркими могут быть средние кольца при ослаблении освещённости

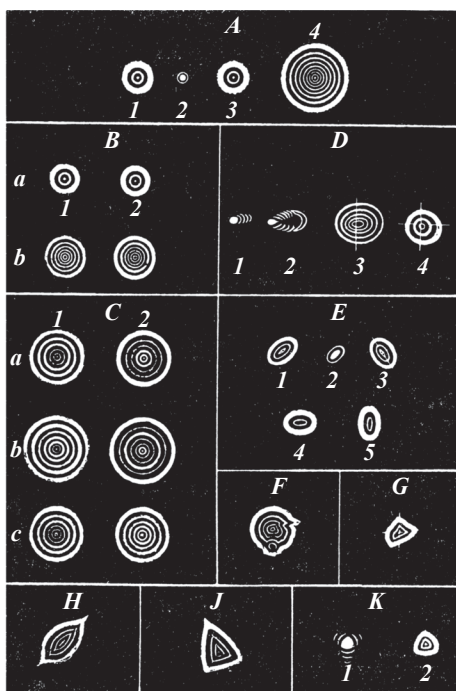


Рис. 24. Форма пятна рассеяния и распределение освещённости изображения в плоскости гауссова изображения и вблизи него

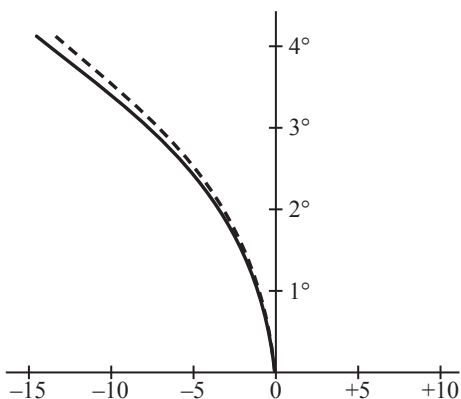


Рис. 25. График продольной сферической aberrации в случае ее недоисправления

центральных и крайних, как у картин с номерами  $I$  (см. рис. 24), или, наоборот, наибольшую освещенность имеют крайние кольца и центр при слабой освещенности средних колец. Обе картины в ряду  $a$  соответствуют исправлению аберрации для крайнего луча, как и в группе  $A$ , но остаточные аберрации промежуточных лучей на различных точках довольно велики. Два следующих ряда  $b$  и  $c$  той же группы соответствуют различным формам кривых аберраций: первая — кривой с выпуклостью вправо, в сторону распространения света, вторая — кривой, сильно изогнутой влево.

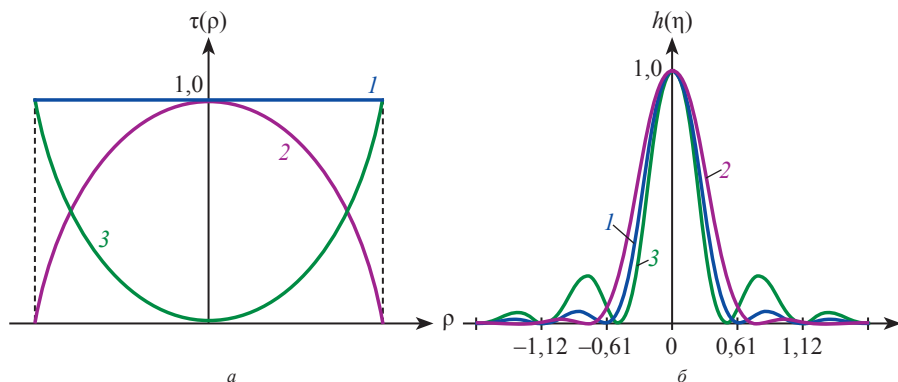
Группа  $D$  содержит картины, наблюдаемые при плохой центрировке, дающей кому на оси, а группа  $E$  — то же в случае астигматизма на оси вследствие той же причины. Картина  $F$  является результатом неоднородностей стекла (свилей), картина  $G$  — результат внутренних натяжений в стекле (закалка). Картины  $H$ ,  $J$  и  $K$  вызываются деформациями линз вследствие сжатия их оправками.

### **3.8. Влияние неравномерности пропускания света по зрачку на распределение освещенности в дифракционном изображении точки (ФРТ). Аподизация дифракционной картины**

Для различных функций пропускания света по зрачку меняется распределение освещенности в дифракционном изображении точки, или дифракционная картина Эри (вид ФРТ) по сравнению с классической функцией  $I$ , что показано на рис. 26 [13].

Если пропускание уменьшается к краям зрачка 2 (см. рис. 26,  $a$ ), то центральный максимум ФРТ расширяется, а кольца исчезают. Если пропускание увеличивается к краям зрачка 3, то центральный максимум сужается, а интенсивность колец увеличивается. Эти изменения по-разному влияют на структуру изображения сложного объекта, и, в зависимости от требований, используются различные функции пропускания, «накладываемые» на область зрачка. Это явление называется *аподизацией* (аподизация — словообразование из греческих корней, обозначающее устранение «основания», т.е. частичное подавление побочных колец дифракционной картины).

Еще в 40-х годах возникла задача определения вида функции зрачка, которая в некотором условном смысле давала бы наилучшее



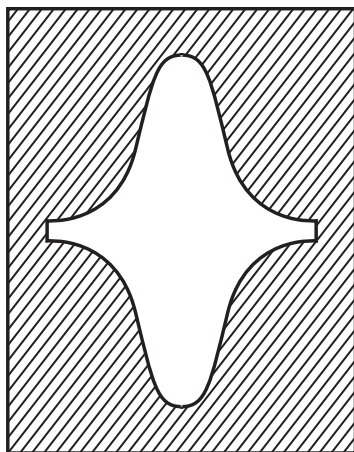
**Рис. 26. Влияние неравномерности пропускания света по зрачку на распределение освещенности в дифракционном изображении точки (или на вид ФРТ):**

*a* — функция пропускания по зрачку; *б* — функция распределения освещенности в дифракционном изображении точки (функция рассеяния точки)

возможное изображение. Этот вопрос исследовался рядом ученых (Штраубель, 1935; Лунеберг, 1944; Остерберг и Вилькинс, 1949; Вольф, 1951; Торальдо ди Франчия, 1952).

Вопросы аподизации подробно были изучены в конце 40–х– начале 50–х годов XX в. французскими учеными Жакино и Руазен–Досье для одномерного экрана и Лансро — для двумерных экранов, имеющих круговую симметрию. В случае одномерного экрана можно использовать зрачок, обладающий постоянной прозрачностью, но ограниченный контуром выбранной формы, чтобы получить эффект аподизации вдоль одной из осей. Это приводит к контуру в виде «шляпы жандарма» (рис. 27) [14].

Изменение функции зрачка достигали с помощью специально сконструированных «фильтров», например, полый линзы соответствующей формы, наполненной поглощающей жидкостью. Общий метод изменения состоит в том, что на одну или несколько поверхно-



**Рис. 27. Контур зрачка в виде «шляпы жандарма»**

стей системы наносится тонкая полупрозрачная пленка подходящего вещества.

Свободная от аберраций оптическая система даёт изображение точки в виде ряда концентрических тёмных и светлых колец. Создавая с помощью фильтра соответствующее распределение амплитуд и фаз на входном зрачке ОС, искусственно ослабляют волну на периферийных участках, устраняя ближайшие к центру один–два светлых дифракционных кольца.

Исследования ученых в 50–х годах XX в. показали, что функцию зрачка можно выбрать так, чтобы радиус первого темного кольца был как угодно мал и в то же время темная зона, окружающая центральное кольцо, была бы сколь угодно велика. Однако постепенное уменьшение радиуса первого темного кольца приводит к постепенному уменьшению яркости центрального диска. Отсюда следует, что наименьшие возможные размеры, а, следовательно, и разрешающая способность ограничены количеством поступающего света.

Наиболее точное по смыслу определение дано в Физическом энциклопедическом словаре: **а п о д и з а ц и я** — действие над оптической системой, приводящее к изменению распределения освещенности в дифракционном изображении светящейся точки.

**Цель аподизации** — частичное подавление вторичных максимумов дифракционной картины при помощи разумно выбранной функции зрачка для улучшения качества изображения и повышения предела разрешения.

Приведем известные из литературы примеры. В астрономии цель аподизации состоит в том, чтобы уменьшить эффект дифракции, размывающей тонкие детали на изображении планет.

Действительно, в астрономии возникает проблема разрешения двойных звёзд с сильно различающейся видимой яркостью. В этом случае возникает вопрос о восприятии слабого точечного источника  $B$  по соседству с яркой точкой  $A$ : дифракционные кольца вокруг изображения  $A'$  могут мешать восприятию изображения  $B'$ . Желательно, чтобы освещённость, даваемая кольцами, была насколько возможно слабой. Можно, в частности, попытаться уменьшить освещённость дифракционных колец, изменяя по соответствующему закону распределение амплитуд на зрачке. Этот приём называется аподизацией дифракционной фигуры. Аподизация достигается при помощи специального экрана, расположенного над апертурой телескопа, который



прогрессивно уменьшает (от центра апертуры к ее краям) количество света, поступающего в инструмент. Практически такой экран состоит из трех или четырех кольцеобразных частей.

В спектроскопии аподизация облегчает обнаружение спутников спектральных линий.

Следует обратить внимание на то, что принятая теория разрешающей способности особенно применима к прямым визуальным наблюдениям. При других методах наблюдения (например, при фотометрическом методе) часто удается обнаружить существование двух объектов с угловым расстоянием, значительно меньшим указанного критерием Релея.

Интересно также сравнить разрешающие способности телескопа и звездного интерферометра Майкельсона [14]. Если о существовании двух звезд судят по первому исчезновению полос, образованных в интерферометре, и если максимальное расстояние между внешними зеркалами последнего равно  $d$ , то пользуясь таким прибором, можно обнаружить двойные звезды с угловым расстоянием между ними вплоть до  $\Psi \approx \lambda / (2d)$ .

Сравнение найденной величины с разрешением телескопа показывает, что для обнаружения двойных звезд с таким разрешением при визуальном наблюдении в телескоп необходимо, чтобы диаметр  $D$  его объектива примерно равнялся  $2,4d$ .

### **3.9. Оптическая передаточная функция (ОПФ) и функция передачи модуляции (ФПМ)**

Наиболее универсальным и информативным критерием оценки качества изображения является ОПФ, появившаяся в середине XX в. [16].

Этот критерий удовлетворяет следующим требованиям:

с помощью него можно оценить качество изображения систем различных назначений, т.е. является универсальным;

он пригоден для оценки качества составных многоступенных систем, в которых ОС является лишь одной из ступеней (напр., фотообъектив + светочувствительный слой пленки, объектив + ПЗС-матрица и т.п.)

ОПФ и её модуль ФПМ удобны для расчета их теоретических значений. В настоящее время в компьютерных программах ZEMAX, DEMOS и др. есть расчет ОПФ, ФПМ;

ОПФ можно измерить на автоматических установках после изготовления и сборки ОС, т.е. обеспечивается объективный характер измерения, результат зависит только от показаний приборов.

При оценке качества изображения ОС ее представляют в виде линейного фильтра, так как при оценке качества всего оптического прибора так представляются его отдельные ступени. В этом случае процесс преобразования сигналов, различных по своей физической природе, достаточно строго представляется с помощью единого математического аппарата, принятого в теории автоматического управления, откуда было введено понятие передаточных функций. Впервые такой подход был предложен Дюффье в 1946 г. и Шаде в 1948 г. В результате ОС была представлена как фильтр, или передатчик низких пространственных частот.

Для ОС новый критерий был назван оптической передаточной функцией (ОПФ). Она характеризует способность ОС создавать изображение определенного качества, зависящее от назначения ОС. Качество изображения (КИ) можно считать тем более высоким, чем меньше отличается изображение от объекта по распределению световой энергии.

При такой трактовке КИ в общем случае двумерный объект характеризуют значениями яркости  $L_v$  в каждой точке, т.е. представляют объект в виде функции  $L(x, y)$  двух независимых переменных. Тогда изображение можно представить в виде функции освещенности  $E'(x, y)$  на плоскости, а воздействие выражается математическим оператором, названным ОПФ [1, 14].

Однако для такого представления ОПФ ОС должна быть линейным фильтром, т.е. обладать свойствами линейности и изопланатичности (пространственной инвариантности). Свойство линейности используется при представлении значения освещенности в изображении двумерного объекта с конечными размерами в виде суммы освещенностей от каждой его точки для некогерентного источника. Закон распределения освещенности в плоскости изображения остаётся постоянным при переходе от одной точки к другой лишь при соблюдении условия изопланатичности.

Математическое описание процесса образования изображения зависит от способа представления предмета. Первый способ представления рассматривает предмет в виде совокупности светящихся точек или линий. Второй способ представляет предмет в виде совокупности элементарных объектов, яркость которых изменяется по синусоидальному (косинусоидальному) закону.

При использовании первого способа представления предмета в основе математического описания ОПФ лежит понятие о функции рассеяния точки (ФРТ) или функции рассеяния линии (ФРЛ). ФРТ  $A'(x', y')$  математически описывает распределение освещённости в изображении точки. ФРТ для безаберрационного объектива при круглой форме зрачка

имеет вид  $A'(x', y') = \left\{ \frac{2J_1(x)}{x} \right\}^2$ , а аргумент  $x$  определяется формулой

$$x = \frac{2\pi}{\lambda} n'_k \sin \sigma'_k r'$$

и позволяет определить  $r'$  в оптических единицах.

Обычно ФРТ нормируют, поскольку нужно знать относительное распределение освещённости:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A'(x', y') dx dy = 1.$$

Изображение бесконечно длинной светящейся линии можно получить суммированием бесконечного количества точек, расположенных вдоль неё.

При использовании второго способа представления предмета каждая синусоидальная (косинусоидальная) составляющая отличается от другой амплитудой, пропорциональной распределению яркости, фазой, т.е. ориентацией на плоскости, и пространственной частотой, равной обратной величине периода изменения яркости.

Изображение предмета, представленного таким способом, получается суммированием изображений синусоидальных гармонических составляющих. При прохождении сигналов синусоидальной формы через ОС их форма не меняется, а изменяются амплитуда и фаза в зависимости от свойств оптических элементов. Этим и объясняется выбор формы составляющих.

В случае предметов произвольной формы распределение яркости в предмете описывается непериодической функцией. В виде такой функции можно представить, например, распределение яркости в прямоугольной mire (мире Фуко), применяемой при исследовании ОС.

Затем выполняется гармонический анализ функции распределения яркости. Если эта функция периодическая, то она разлагается в ряд Фурье, а если непериодическая, то её выражают интегралом Фурье, представляющим собой сумму бесконечно близких по частоте синусо-

идальных составляющих яркости. Непериодическая функция должны быть конечной и интегрируемой.

В результате распределение яркости на предмете представляет собой спектр синусоидальных составляющих элементарных гармонических предметов, роль которых может выполнять синусоидальная решётка с бесконечно протяжёнными полосами. Следовательно, второй способ представления предмета основан на применении математического аппарата Фурье к оценке качества изображения.

Это и позволило оценивать качество изображения по передаче пространственных частот.

Преобразование Фурье позволяет существенно упростить расчёты распределения освещённости в изображении по известному распределению яркости в предмете и функции рассеяния, описывающей распределение освещённости в отдельной точке (ФРТ) или элементарной линии ФРЛ. Уравнения гармонических составляющих, а также ряд и интеграл Фурье часто представляют в комплексном виде и получают компактную запись.

При выполнении Фурье–преобразования изображения используют известную теорему: преобразование Фурье некоторой функции, являющейся свёрткой других функций, равно произведению преобразований Фурье функций, подвергнутых свёртке.

Рассмотрим особенности Фурье–преобразования изображения на примере двумерного предмета. Для него нет необходимости вычислять распределение освещённости  $E'(x', y')$  в плоскости изображения как свёртку распределения яркости предмета с функцией рассеяния [16]. На основании приведённой выше теоремы задача упрощается: преобразование Фурье  $g'(N_x, N_y)$  изображения находят как произведение преобразования Фурье  $g(N_x, N_y)$  предмета (от распределения яркости в предмете) и преобразования Фурье  $D(N_x, N_y)$  изображения изолированной точки (функции рассеяния точки).

В результате преобразование Фурье от распределения освещённости в изображении кратко записывается в виде

$$g'(N_x, N_y) = D(N_x, N_y)g(N_x, N_y),$$

где  $D(N_x, N_y)$  — называется оптической передаточной функцией. Она показывает, как передаётся ОС каждая частотная составляющая, т.е. пространственная частота с учётом aberrаций, дифракции, ошибок изготовления.

ОПФ — преобразование Фурье от функции рассеяния и представляет собой комплексную функцию:

$$D(N_x, N_y) = T(N_x, N_y) \exp [i\varphi(N_x, N_y)],$$

где  $T(N)$  — модуль комплексной функции;  $\varphi(N)$  — аргумент функции.

Рассматривая, как изображается отдельная частотная составляющая предмета с известной функцией рассеяния, когда предмет представлен в виде косинусоидального распределения яркости с постоянной составляющей  $L_0$ :

$$L(x) = L_0 + L_1 N_x \cos 2\pi,$$

период  $p = 1/N$ , где  $N$  — пространственная частота.

Изображение предмета с косинусоидальным распределением яркости также является косинусоидальным, но отличается двумя особенностями. Первая: коэффициент модуляции отличен от единицы.

Для предмета модуляция определяется отношением  $m = L_1 / L_0$ , а для изображения —  $m' = L_1 T(N) / L_0$ , следовательно  $T(N) = m' / m$ .

Значение модуля  $T(N)$  равно отношению коэффициента модуляции  $m'$  изображения гармонической составляющей к коэффициенту модуляции  $m$  предмета и называется коэффициентом передачи модуляции (КПМ). Следовательно,  $T(N)$  — функция передачи модуляции (ФПМ), которая определяет зависимость коэффициента передачи модуляции (КПМ) от пространственной частоты. КПМ равен единице для пространственной частоты, равной нулю. График ФПМ показан на рис.???

Вторая особенность отличия распределения освещённости изображения от предмета заключается в наличии сдвига косинусоиды на угол  $\varphi(N)$ . Функция  $\varphi(N)$  — функция передачи фазы (ФПФ) (рис. 28).

Кривая (форма) ФПМ зависит от степени симметрии ФРЛ относительно оси ординат. В случае симметрии функции ФРЛ получают ФПФ равна нулю или  $\pi$ . При асимметричной ФР, что может быть для ОС на краю поля, при дефектах центрировки и т.п. ФПФ для  $N=0$  может принимать различные промежуточные значения между  $\pi$  и  $-\pi$ . Для вне-осевых точек изображение может заметно не совпадать с его идеальным положением.

Для ОС важно получить соответствие изображения и предмета по контрасту. Контраст  $K$  предмета характеризуется отношением разности и суммы их максимальных и минимальных значений. Для предмета

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}, \quad (51)$$

где  $L_{\max} = L_0 + L_1$ ;  $L_{\min} = L_0 - L_1$ . Подставив эти выражения в (51), получим  $K = L_1/L_0$ , коэффициент, показывающий модуляцию амплитудного значения относительно среднего, поэтому его также называют коэффициентом модуляции.

Контраст изображения  $K'$  определяется аналогичным соотношением для освещённости, поэтому в результате можно получить  $T(N) = K'/K$  [13]. Только при использовании записанных выше формул можно говорить о том, что  $T(N)$  характеризует передачу контраста ОС.

ОПФ показывает формирование элементов предмета от максимальных до минимальных, контраст которых близок к нулю. ОПФ — наиболее информативный критерий оценки качества изображения. Он оценивает два параметра изображения.

1. Количество сформированных элементов с соответствующим контрастом.
2. Качественное соответствие геометрического положения элементов изображения по отношению к предмету.

Первый параметр определяется функцией передачи модуляции (ФПМ), ранее называлась частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ).

Второй параметр определяется функцией передачи фазы (ФПФ), ранее называлась частотно-фазовой характеристикой (ЧФХ).

Выполнив различные преобразования ОПФ, можно получить частные критерии, включая критерии Релея и Штреля.

На рис. 28, а приведен график ФПМ — зависимости коэффициента передачи модуляции от пространственной частоты, а на рис. 28, б — график зависимости фазы от пространственной частоты. Точка  $N_{\text{пред}}$

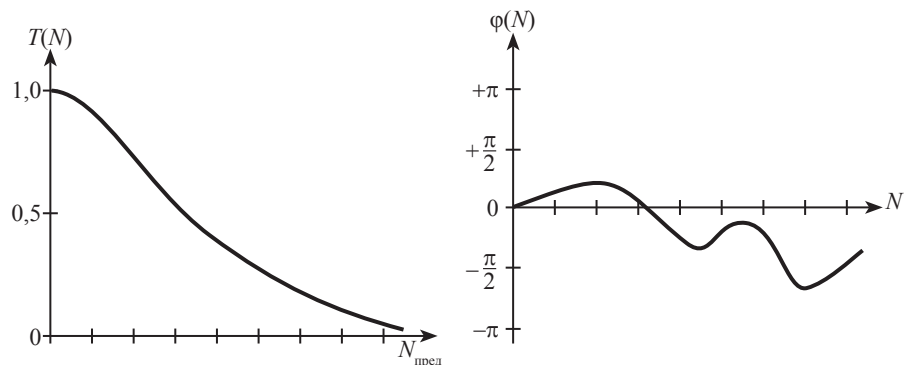


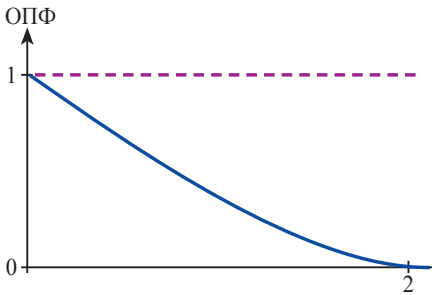
Рис. 28. Примерный вид графиков функции передачи модуляции (а) и функции передачи фазы (б)

пересечения кривой  $T(N)$  с осью абсцисс представляет собой предельное значение пространственной частоты, т.е. предел разрешения.

ОПФ и ФПМ имеют ещё одно важное свойство, позволяющее определить эти характеристики для многоступенной системы перемножением ОПФ и ФПМ отдельных ступеней.

### Влияние aberrаций и центрального экранирования на оптическую передаточную функцию (ОПФ)

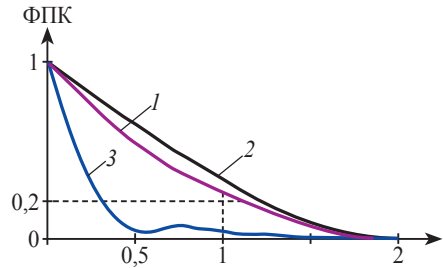
На рис. 29 показаны графики ОПФ для идеальной и безабберационной систем см. [13].



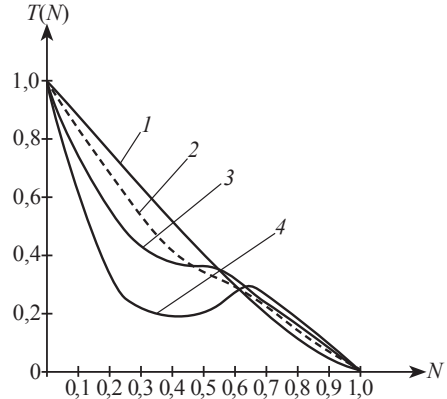
**Рис. 29. Графики ОПФ:**  
 — идеальная ОС;  
 — безабберационная ОС

ОПФ оптической системы, имеющей aberrации больше волновых критериев качества изображения, ОПФ становится меньше. На графике ФПК можно показать, как aberrации влияют на форму кривой передачи модуляции (контраста) (рис. 30). Кривые ФПК в присутствии aberrаций могут иметь сложную форму, но они никогда не превышают кривую безабберационной ОС.

На рис. 31 показаны графики ФПК для ОС без экранирования и с различными коэффициентами экранирования, что характерно для ЗС и ЗЛС.



**Рис. 30. Влияние aberrаций на функцию передачи контраста:**  
 1 — дифф. ограниченная ОС; 2 — безабберационная ОС; 3 — геом. ограниченная ОС



**Рис. 31. Функции передачи модуляции:**  
 1 — система без экранирования зрачка; 2 — коэффициент экранирования  $k_3=0,3$ ; 3 —  $k_3=0,4$ ; 4 —  $k_3=0,5$

## РАЗДЕЛ 4

# ГЛАЗ ЧЕЛОВЕКА КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА И ПРИЁМНИК ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Зрение даёт человеку возможность познавать окружающий мир и осуществляется при помощи сложной оптической и физиологической системы — глаза. С помощью глаза человек получает около 90% информации. Глаз — прибор весьма чувствительный: диапазон изменения яркостей, воспринимаемых глазом, составляет  $10^{12}$ ; глаз различает до 25 000 оттенков в солнечном свете и может воспринимать вспышки света длительностью менее миллисекунды [17].

На протяжении многих тысячелетий глаз оставался единственным известным человеку естественным приемником оптического излучения. Благодаря своей исключительной сложности глаз стал объектом многих исследований.

Демокрит (466–370 гг. до н.э.) объяснял зрительное ощущение воздействием попадающих в глаз атомов, которые испускает светящееся тело.

Предполагают, что первое описание строения человеческого глаза дано в работах Галена (130–200 гг.), описание несовершенно, но уже упоминается зрительный нерв, сетчатка, хрусталик. Через девять веков знаменитый арабский ученый Аль-Газен (XI в.) попытался осмыслить механизм формирования зрительного образа.

Великий итальянский художник и естествоиспытатель Леонардо да Винчи (1452–1519) писал о восприятии изображения на сетчатке. Сохранились его рисунки, объясняющие строение глаза и построение изображения в нём.

И. Кеплер в начале XVII в. впервые высказал мысль о том, что на сетчатке глаза изображение является перевернутым. Он понял, что хрусталик необходим для аккомодации, но неправильно объяснил



механизм процесса. Лишь в начале XIX в. Томас Юнг правильно объяснил процесс аккомодации.

Трёхсотлетняя история развития представлений о цветовом зрении основана на исследованиях, начатых И. Ньютоном (1643–1756 гг.) в 1704 г. М. В. Ломоносов в 1756 г. высказал мысль о наличии в глазу светочувствительных аппаратов трёх видов. В 1802 г. Т. Юнг (1773–1829 гг.) выдвинул теорию трихроматичности. Его идея была подтверждена лишь в 60–е годы XX в., когда под микроскопом была изучена способность отдельных колбочек поглощать свет с различными длинами волн и были обнаружены три типа колбочек. Теорию Юнга принял Герман Гельмгольц и она известна как теория цветового зрения Юнга–Гельмгольца. Параллельно этой теории разработана теория немецкого физиолога Эвальда–Грина (1834–1918 гг.)

Гельмгольц Герман Людвиг Фердинанд (1821–1894 гг.) — немецкий учёный, член–корр. Петербургской академии наук, автор фундаментальных трудов по физике, биофизике, физиологии, психологии. Впервые математически обосновал закон сохранения энергии и др. Автор основополагающих трудов по физиологии слуха и зрения.

В 1856 г. опубликовал «Физиологическую оптику». Г. Гельмгольц писал, что «глаз — часть мозга, выдвинутого на периферию».

В 1850 г. Г. Гельмгольц изобрёл приспособление (зеркало с отверстием) для рассматривания глазного дна. Это было гениальным открытием. В честь него в Москве назван институт глазных болезней им. Г. Гельмгольца.

Большой вклад в изучение глаза внёс шведский офтальмолог Альвар Гульстранд (1862–1932 гг.). За труды по оптике глаза ему присуждена Нобелевская премия в 1911 г. Особенно возрос интерес к проблеме зрения в XX в. в связи с развитием оптических приборов, медицинской оптики, атмосферной оптики, аэрофотосъёмки, тепловидения. Сформировалась наука, изучающая глаз и его работу — физиологическая оптика.

В её развитие внесли значительный вклад отечественные ученые С.И. Вавилов, С.В. Кравков, В.В. Мешков, Г.В. Гершун, А.В. Луизов, Н.П. Травникова, Н.И. Пинегин, М.А. Островская, А.Л. Ярбус и др.

Зарождение теории оптических систем и прикладной оптики начиналось с изучения процесса зрения.

## 4.1. Строение глаза

Орган зрения — сложная система. Его называют зрительным анализатором [18].

Он состоит из трёх отделов: периферического; проводникового; центрального (рис. 32).

Периферический отдел образуют два глазных яблока (ГЯ), каждое из которых состоит из оптической и световоспринимающей систем, связанных воедино.

Глазное яблоко лежит в плоскости глазницы. Из ГЯ выходит зрительный нерв, соединяющий его с головным мозгом.



Рис. 32. Блок-схема зрительного анализатора

ОС каждого глаза состоит из оптических сред, разделённых преломляющими поверхностями и формирующих изображение на сетчатке (в световоспринимающей системе) и двух мышечных систем (МС):

одна МС управляет движением глаза;

вторая МС обеспечивает фокусировку изображения на сетчатке и регулирует освещённость на ней, изменяя размер зрачка.

Световоспринимающей системой глаза является его сетчатая оболочка (сетчатка, ретина), содержащая светочувствительные клетки — зрительные рецепторы.

Проводниковым отделом служат зрительные нервы, которые соединяют отдельными волокнами зрительные рецепторы с мозгом, то есть с клетками затылочной части коры головного мозга, где расположен центральный отдел зрительного анализатора, он воспринимает и анализирует то, что видит глаз.

Рассмотрим подробно строение глазного яблока (рис. 33).

Глазное яблоко человека имеет форму, близкую к шаровидной, его диаметр ~24 мм у взрослого человека (у новорожденных ~16 мм).

ГЯ размещается в особом полостном пространстве черепа — глазнице и состоит из ядра и трёх оболочек.

Наружная фиброзная, или волокнистая оболочка, довольно прочная, позволяет сохранить форму ГЯ, защищает ядро. Её задний отдел называют склерой — это белочная (белковая) оболочка цвета вареного белка, её толщина ~1 мм (см. рис. 33–35).

В передней части ГЯ склера переходит в более выпуклую прозрачную роговую оболочку, или роговицу, толщина её в центральной зоне уменьшается до ~0,5 мм. Форма первой поверхности роговицы — эллипсоид. Через роговицу в глаз проникает свет. Роговица не имеет кровеносных сосудов, имеет почти равную толщину, толще к периферии.

На границе между роговицей и белочной оболочкой находится венозный синус (по нему из глаза оттекает венозная кровь и лимфа). Здесь эпителий роговицы переходит в конъюнктиву, выстилающую переднюю часть белочной оболочки.

Конъюнктивa — соединительная оболочка глаза — тонкая прозрачная слизистая оболочка, покрывающая заднюю поверхность век и переднюю поверхность ГЯ (до роговицы).

Средняя оболочка, расположенная под склерой, богата кровеносными сосудами, поэтому называется сосудистой (хо-

ри оидея). В ней выделяют 3 части:

переднюю — радужную оболочку или радужку.

среднюю — ресничное тело;

заднюю — собственно сосудистую оболочку.

Сеть мелких кровеносных сосудов питает ГЯ.

Спереди сосудистая оболочка утолщается и переходит в ресничное тело и радужную оболочку.

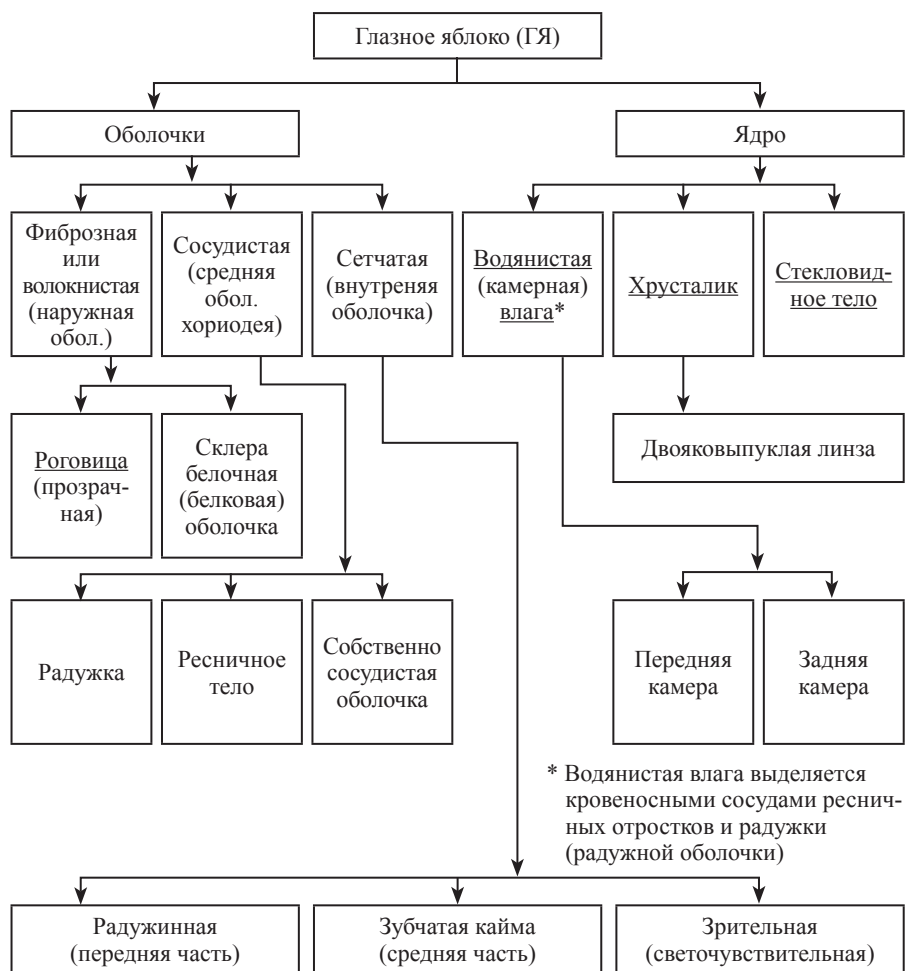


Рис. 33. Строение глазного яблока

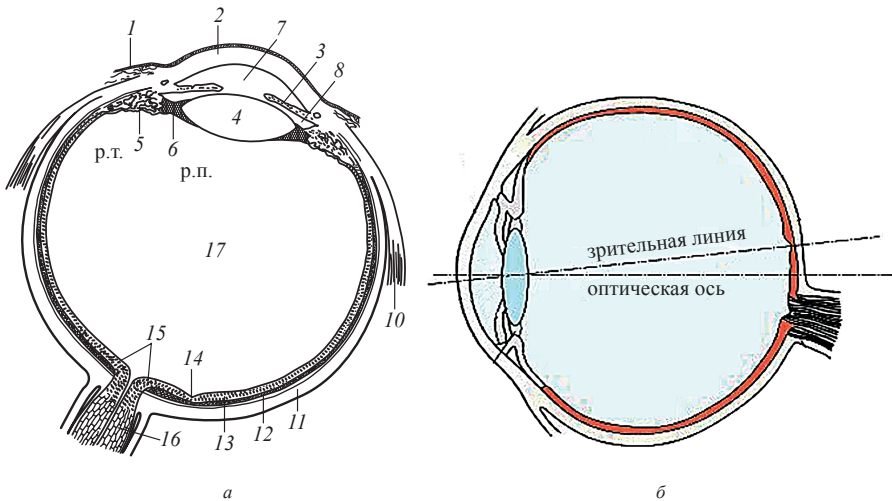
Радужная оболочка состоит из нежных соединительно-тканых фибрилл (волокон), кровеносных сосудов мышечных волокон и пигментных клеток (определяют цвет глаз).

Отверстие в центре радужки — зрачок. Специальные кольцевые и радиальные мышечные элементы внутри радужной оболочки сужают и расширяют зрачок ( $D=2 \dots 8$  мм) при изменении освещённости.

Своим наружным краем радужка переходит в ресничное тело — круговой валик. От переднего края отходит до 70 ресничных отростков, а от них идут тонкие упругие волокна, другим концом они прикрепляются к капсуле хрусталика по его краю (экватору). Они образуют ресничный пояс, поддерживающий хрусталик (рис. 34, 35).

В соединительно-тканной основе ресничного тела кроме сосудов содержатся гладкие мышечные волокна, круговые и меридиональные, составляющие ресничную (цилиарную) мышцу, изменяющую форму хрусталика и обеспечивающую аккомодацию глаза, т.е. фокусировку на предмет.

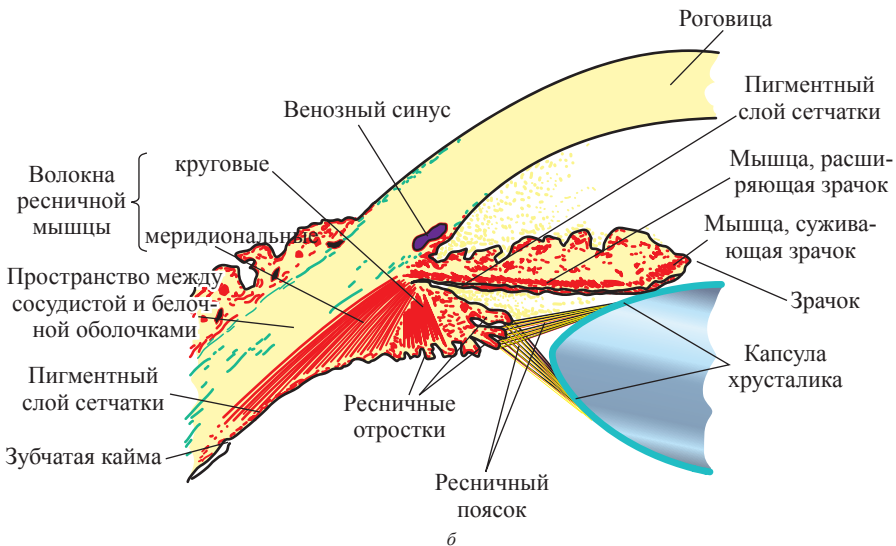
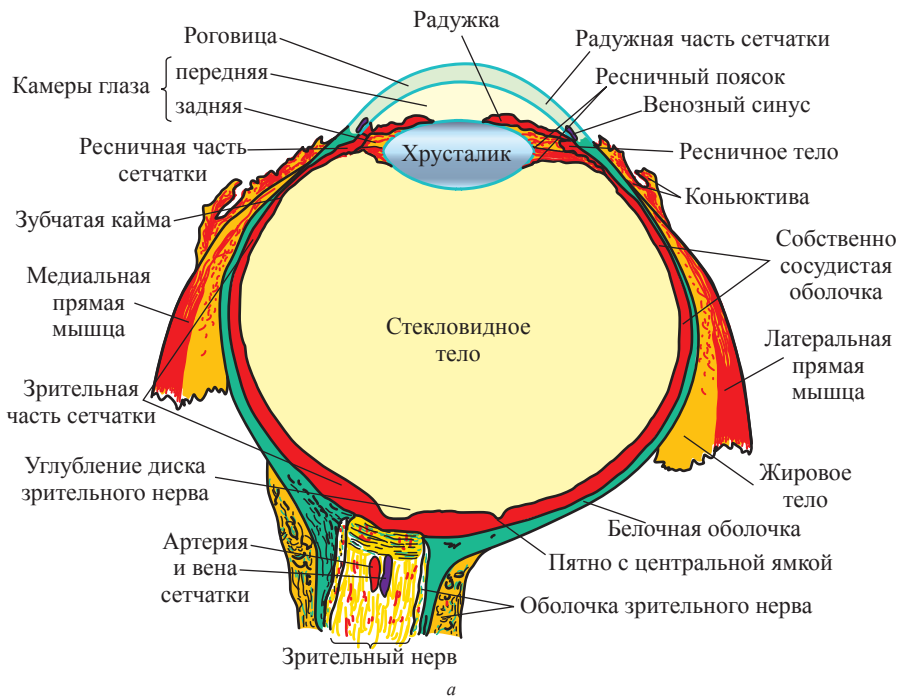
Хрусталик имеет форму двояковыпуклой линзы с закруглёнными краями. Образован прозрачными волокнами эпителия



**Рис. 34. Горизонтальный разрез глазного яблока (схема):**

1 — конъюнктива; 2 — роговица; 3 — радужка; 4 — хрусталик; 5 — ресничное тело; 6 — связка, при помощи которой хрусталик прикреплён к ресничному телу (ресничный пояс); 7 — передняя камера глаза; 8 — задняя камера глаза; 9, 10 — мышцы глазного яблока; 11 — склера; 12 — собственно сосудистая оболочка;

13 — сетчатка; 14 — жёлтое пятно (пятно сетчатки); 15 — диск зрительного нерва; 16 — зрительный нерв; 17 — стекловидное тело



**Рис. 35. Строение глаза:**

*a* — горизонтальный разрез; *б* — передняя часть сосудистой оболочки [18]

(эпителий — ткань, покрывающая поверхность кожи, роговицу глаза, а также выстилающая все полости организма), более плотными в центральной части и более мягкими по периферии ( $n$  выше в центре на 1,5% по сравнению с периферией). Хрусталик имеет слоистое строение. Обе поверхности принимаются сферическими, но в действительности они ближе к кривой 2-ого порядка. Центральная часть хрусталика почти сферическая, а по краям уплощается. У детей хрусталик бесцветен, прозрачен и эластичен, у взрослых более упруг, к старости становится жестким, мутноватым, приобретает желтоватый оттенок.

К старости, когда хрусталик желтеет и пропускает меньше голубого и зелёного цвета, объекты наблюдателю представляются более желтыми. Этим иногда объясняется изменение цветовой гаммы в картинах в зависимости от возраста художника.

Полость между роговицей и радужкой заполнена жидкостью — водянистой влагой и называется передней камерой ( $n=1,336$ ). Полость между радужкой и хрусталиком также заполнена водянистой влагой и называется задней камерой. Водянистая влага слабо преломляет свет —  $n=1,336$ . Она выделяется кровеносными сосудами ресничных отростков и радужки. Обе камеры сообщаются через зрачок. Внутренние жидкости находятся под давлением (внутриглазное давление). За хрусталиком находится стекловидное тело, оно состоит из прозрачного студенистого межклеточного вещества и не имеет сосудов (см. рис. 35).

Оптическая система глаза, состоящая из роговицы, водянистой влаги, хрусталика и стекловидного тела образует изображение на сетчатке (сетчатой оболочке, или ретине) — внутренней оболочке ГЯ.

Поверхность сетчатки (рис. 36), рассматриваемая при помощи микроскопа, представляется как бы покрытой сеткой с шестигранными ячейками (отсюда название сетчатка).

Она имеет сложное строение. Задняя её часть, большая

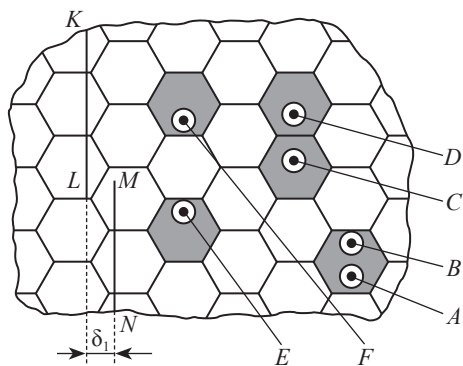


Рис. 36. Поверхность сетчатки, рассматриваемая при помощи микроскопа

— светочувствительная. Она состоит из 10 микроскопических слоев.

В 9-ом слое — окончание волокон зрительного нерва. Она содержит зрительные рецепторы — колбочки и палочки.

Их число огромно:

палочки (~130 млн) диаметром ~ 2 мкм, длиной 63–81 мкм расположены по всей сетчатке и обеспечивают светочувствительность (сумеречное, ночное зрение), расположены в боковых частях.

колбочки (~7 млн) диаметром ~5 мкм, длиной 35 мкм сосредоточены вокруг желтого пятна (макулы) и обеспечивают цветовосприятие (дневное зрение), играют роль в цветном зрении и преобладают в средней части сетчатки.

В задней части сетчатки выделяются два участка — диск зрительного нерва и желтое пятно (по новой классификации — «пятно сетчатки»)

Диск — место выхода из ГЯ зрительного нерва. Здесь сетчатка не содержит светочувствительных элементов. Это круглый участок сетчатки на дне глаза диаметром ~1,5 мм называется диском зрительного нерва. Соответственно ему в поле можно обнаружить слепое пятно. Желтое пятно (ЖП), или пятно сетчатки расположено над слепым пятном в том месте, где зрительная ось глаза, наклонённая к оптической оси на угол  $5^\circ$ , пересекает сетчатку. Желтое пятно площадью  $1 \text{ мм}^2$  имеет овальную форму.

Это самое чувствительное к свету место сетчатки. Середина его углубляется в центральную ямку, являющейся областью наиболее ясного видения. Содержит только колбочки, их число 4–5 тыс. Фовео, или фовеола — это участки сетчатки диаметром ~0,4 мм, что соответствует углу в  $1,2^\circ$ .

Зрительная ось глаза — линия, проходящая через центр желтого пятна и заднюю узловую точку глаза (см. рис. 34).

В ЖП содержатся придающий ему соответственную окраску пигмент, а помимо колбочек встречаются и палочки, но число колбочек значительно превышает число палочек.

Оптическая система глаза [17] представляет собой нецентрированную последовательность несферических преломляющих поверхностей, разделяющих среды с различными показателями преломления. Однако для практических расчетов форму поверхностей предполагают сферической, а линию, проходящую вблизи центров



кривизны сферических поверхностей принимают в качестве оптической оси глаза (см. рис. 34). ОС глаза — система и м м е р с и о н н а я. Это значит, что формируемое оптикой глаза изображение наблюдаемых предметов расположено в среде, показатель преломления которой отличен от единицы.

ОС глаза — система панкратическая (с  $f' = \text{var}$ , плавно меняющимся), так как форма хрусталика изменяется при наблюдении разноудалённых предметов, поэтому изменяется  $f'$  глаза.

ОС глаза — система адаптивная. Формируемое на сетчатке глаза изображение воспринимается светочувствительным слоем, состоящим из колбочек и палочек. Изображение преобразуется в нервное возбуждение и направляется в мозг, в котором происходит самый сложный и загадочный процесс преобразования светового возбуждения в зрительные ощущения.

Глазное яблоко может вращаться в пределах  $45 \dots 50^\circ$ , выполняя сканирование предмета. Для этого глаз совершает саккады — непрерывные скачкообразные движения (рис. 37).

Глазной базис (расстояние между зрачками глаз) у взрослого человека  $b = 58 \dots 72$  мм, в среднем  $b_{\text{cp}} = 65$  мм.

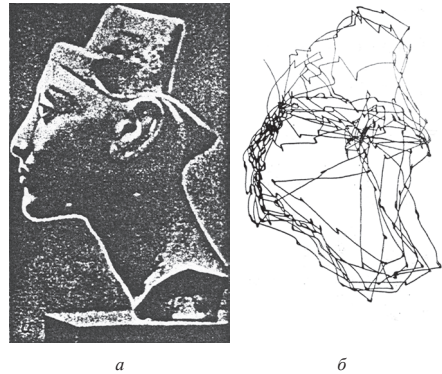


Рис. 37. Запись движений глаза (б) при рассмотрении в течение 2 мин фотографии скульптурного портрета египетской царицы Нефертити (а) (по А.Л. Ярбусу)

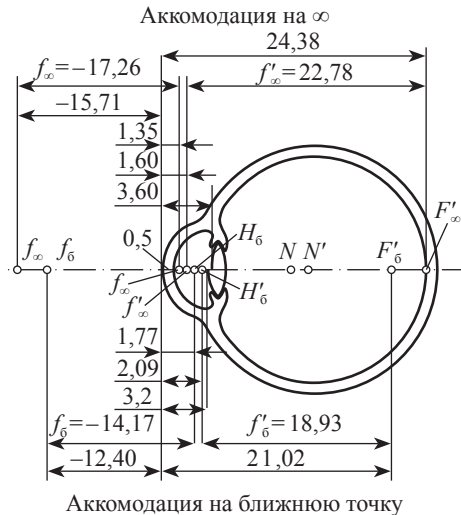


Рис. 38. Параметры схематического глаза при аккомодации на точку предмета в бесконечности (передний и задний фокусы  $F'_\infty, F_\infty$  и переднее и заднее фокусные расстояния  $f'_\infty, f_\infty$ ) и при аккомодации на ближнюю точку ( $F_6, F'_6, f_6, f'_6$ );  $H_\infty, H'_\infty$  и  $H_6, H'_6$  — главные точки  $10^\circ \psi'_{\text{гл}} = 5'$

Угол конвергенции (сведение зрительных осей глаза за счет поворота глазных яблок навстречу друг другу) составляет  $32^\circ$ .

При наблюдении близкорасположенных предметов глаза поворачиваются, и их зрительные оси составляют некоторый угол.

Оптические постоянные (характеристики) глаза у различных людей разные, поэтому установлены средние значения этих постоянных [3].

Глаз со средними оптическими постоянными называется *схематическим* (по Гульстранду) (рис. 38). Роль апертурной диафрагмы в глазу выполняет зрачок глаза.

Оптическая система глаза образует на сетчатке действительное перевернутое изображение предмета.

#### 4.2. Основные характеристики глаза $f'_{\text{гл}}$ , $D_{\text{гл}}$ , $2\omega_{\text{гл}}$

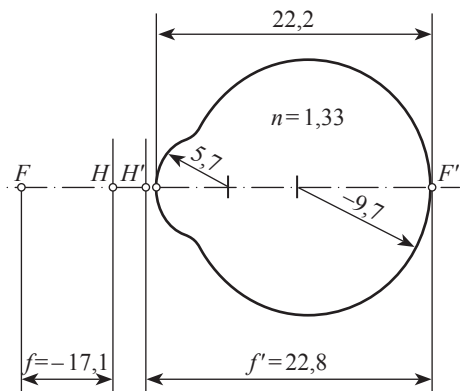


Рис. 39. Параметры приведённого глаза

Для еще большего упрощения расчетов ОС, работающих с глазом, разработана модель редуцированного, или приведенного глаза (рис. 39). При выборе постоянных редуцированного глаза принимались следующие условия: преломляющие поверхности глаза заменяются одной эквивалентной преломляющей поверхностью, разделяющей две среды — воздух и стекловидное тело; расстояние между главными точками схематического глаза мало, поэтому

- $r_1 = 7,7$
- $r_2 = 6,8$
- $r_3 = 10,0$
- $r_4 = 7,91$
- $r_5 = -5,76$
- $r_6 = -6,00$
- $r_7 = -10,5$

- $d_1 = 0,5$
- $d_2 = 3,1$
- $d_3 = 0,55$
- $d_4 = 2,42$
- $d_5 = 0,64$
- $d_6 = 17,18$

1	
1,376	роговица
1,336	водянистая влага
1,386	хрусталик
1,406	ядро хрусталика
1,386	хрусталик
1,336	стекловидное тело
1,336	стекловидное тело

можно считать их совпадающими.

Согласно этой модели имеем:

заднее фокусное расстояние  $f'_{\text{гл}} = 22,8$  мм ( $\Phi = 58,6$  дптр);

переднее фокусное расстояние  $f_{\text{гл}} = -17,1$ , так как  $n=1$ ,  $n'=1,336$ ;

диаметр зрачка глаза меняется в пределах  $D_{\text{гл}} = 1,5 \dots 8$  мм;

относительное отверстие ОС глаза  $(D/f')_{\text{гл}} = 1:15 \dots 1:2,8$ ;

освещенность на сетчатке  $E'_{\text{вгл}} = (\pi \tau_{\text{гл}} L_{\text{в}} / 4) (D_{\text{гл}} / f'_{\text{гл}})^2$  при этом изменяется в 30 раз.

Угловое поле глаза:

в вертикальной плоскости  $2\omega_{\text{гл}} = 125^\circ$ ;

в горизонтальной плоскости  $2\omega_{\text{гл}} = 150^\circ$  (для ориентации);

поле ясного видения  $2\omega_{\text{гл}} = 2,5^\circ$ .

Конструктивные параметры ОС глаза при минимальной, равной нулю, аккомодации (в состоянии покоя) в соответствии со схемой Гюльстранда представлены ниже [17]:

### 4.3. Свойства глаза

#### Аккомодация и рефракция

А к к о м м о д а ц и я — способность глаза приводить изображения разноудалённых предметов на поверхность сетчатки.

Это достигается за счет изменения кривизны поверхностей хрусталика (с помощью ресничной (цилиарной) мышцы), следовательно, изменения  $f'_{\text{гл}}$ . Изменение кривизны хрусталика может изменить его

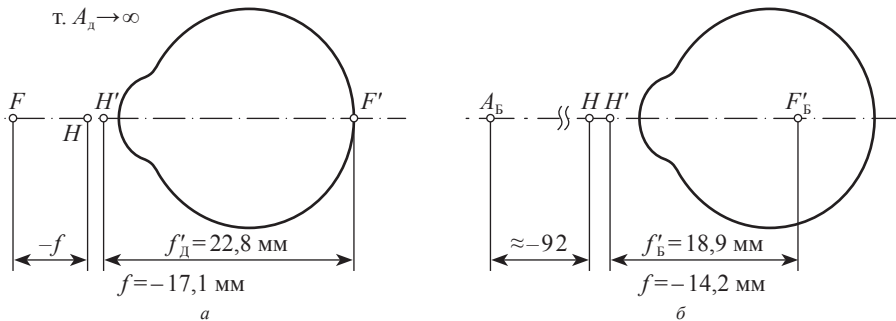


Рис. 40. Фокусные расстояния глаза при аккомодации глаза для рассматривания бесконечно удалённого предмета и близкорасположенного предмета

оптическую силу на 20%.

Расстояние, в пределах которого глаз может резко видеть предметы, называется о б л а с т ь ю а к к о м о д а ц и и. Наиболее удалённую точку, которую глаз может ясно видеть при совершенно расслабленной цилиарной мышце, называют дальней точкой ( $R$ ) глаза. Если  $s_1 = -\infty$ , то  $f'_{\text{гл}} = 22,8$  мм, точка  $F'_{\text{гл}}$  совпадает с сетчаткой, мышцы глаза не напряжены (иногда говорят «глаз в состоянии спокойной аккомодации») (рис. 40).

$s_{\text{д}} = s_1 = -\infty$  — расстояние до дальней точки зрения.

Точка, которую можно видеть при наибольшем для данного глаза напряжении мышцы, называется ближней точкой ( $P$ ) глаза.

$s_{\text{б}} = s_1 = -92$  мм — расстояние до ближней точки ясного видения, при этом  $f'_{\text{гл}} = 18,93$  мм.

Обычно глаз быстро утомляется при аккомодации на ближнюю точку, и обычно рассматривание близких предметов производится с расстояния наилучшего (удобного) зрения, которое для нормального глаза принимается  $p = 250$  мм.

Величины, обратные  $s_{\text{д}}$  и  $s_{\text{б}}$ , называют вершинными рефракциями (сходимостями). Рефракция выражается в диоптриях.

$1/s_{\text{д}} = R_{\text{д}}$  — рефракция (сходимость) для дальней точки.

$1/s_{\text{б}} = R_{\text{б}}$  — рефракция для ближней точки.

Разность рефракций  $A_{\text{к}} = R_{\text{б}} - R_{\text{д}}$  называют шириной, объемом (или силой) аккомодации.

$$A_{\text{к}} \approx 11 \text{ дптр} \quad \infty \quad 92 \text{ мм};$$

$s_{\text{д}} \quad s_{\text{б}}$

С возрастом объём аккомодации изменяется. После 50 лет чаще всего расстояние до ближней точки  $s_{\text{б}} = 400$  мм и  $A_{\text{к}} = 2,5$  дптр.

## Адаптация

А д а п т а ц и я — способность глаза приспосабливаться к различным яркостям светового воздействия.

Глаз реагирует на большой перепад яркостей, составляющий  $1:10^{11}$ :  $L_{\text{предм}} \approx 10^{-6} \dots 10^5$  кд/м<sup>2</sup>, причем при  $L_{\text{предм}} = 10^{-6} \dots 1$  кд/м<sup>2</sup> работают только п а л о ч к и, а при  $L = 1 \dots 10^5$  кд/м<sup>2</sup> работают только к о л б о ч к и.

При яркостях выше  $L = 1,6 \dots 10^5$  кд/м<sup>2</sup> происходит о с л е п л е н и е г л а з а.

При изменении уровня яркости наблюдаемого поля автоматически включается целый ряд механизмов, которые обеспечивают перестройку зрения. Наиболее заметной реакцией глаза на изменение яркости в

первую очередь является изменение величины диаметра зрачка глаза, который меняется от 8 мм до 2 мм, т.е. в 4 раза, а площадь зрачка — в 16 раз. Однако этого недостаточно для компенсации изменения яркости. Природа создала наиболее радикальный механизм адаптации — изменение чувствительности сетчатки.

Когда глаз начинает приспосабливаться к темноте, то постепенно возрастает чувствительность сетчатки, но её светочувствительные элементы — колбочки и палочки — ведут себя различно. В колбочках чувствительность возрастает в несколько десятков раз по сравнению с чувствительностью к дневному свету. В палочках чувствительность медленно, в течение часа и более, увеличивается в полной темноте в сотни тысяч раз.

Различают две разновидности адаптации глаза:

1. **Темновую** — при переходе наблюдателя из светлого помещения в тёмное, она во времени длится от 30–40 мин до одного часа. Темновая адаптация возникает при уменьшении яркости фона от некоторого значения  $L_{пр}$ , называемой яркостью предадаптации, до значения более низкого уровня яркости (в пределе до 10–6 кд/м<sup>2</sup>, т.е. практической темноты).

2. **Световую адаптацию** — при переходе наблюдателя из темного помещения в светлое. Она возникает при увеличении яркости от малого её значения (10–6 кд/м<sup>2</sup>) до некоторого высокого уровня  $L_{пр}$ .

Световая адаптация происходит быстрее, чувствительность снижается и достигает постоянной величины через 5–8 мин.

Наименьшая (пороговая) освещённость, которую ещё способен воспринимать глаз, составляет  $10^{-9}$  лк.

### **Контрастная чувствительность глаза**

Глаз весьма чувствителен к контрасту яркостей предметов  $L_{пр}$  и наблюдаемого пространства  $L_{ф}$ . Контраст яркостей предмета и фона, на котором он различается, определяется по формуле  $K = \frac{L_{пр} - L_{ф}}{L_{ф}}$ .

Минимальная разность яркостей предмета и фона, при которой глаз может различать предмет  $\Delta L_{\min} = (L_{пр} - L_{ф})_{\min}$ , называется **пороговой**

**разностью яркости**, а отношение  $L_{ф} = \frac{\Delta L_{\min}}{L_{пр}}$  — **пороговым**

контрастом. Величина, обратная пороговому контрасту  $L_{\text{пр}} / (L_{\text{пр}} - L_{\text{ф}})$ , является мерой контрастной чувствительности глаза. Она равна 60 при  $L_{\text{ф}} = 130 \dots 6400$  кд/м<sup>2</sup>.

При	$L_{\text{ф}} = 10^{-5}$ кд/м <sup>2</sup>	$D_{\text{гл}} = 7$ мм;
	$L_{\text{ф}} = 0,1$ кд/м <sup>2</sup>	$D_{\text{гл}} = 5,7$ мм;
	$L_{\text{ф}} = 10$ кд/м <sup>2</sup>	$D_{\text{гл}} = 2,3$ мм;
	$L_{\text{ф}} = 10^4$ кд/м <sup>2</sup>	$D_{\text{гл}} = 2$ мм.

## Аберрации оптической системы глаза

Глаз как оптический прибор удовлетворяет ряду противоречивых требований: он имеет высокую разрешающую способность, большое угловое поле и весьма высокую чувствительность. Это достигается за счёт большой подвижности глаза, которая позволяет рассматривать предметы по частям, фокусируя все время наиболее интересующую часть поля на макулу (жёлтое пятно). Благодаря этой особенности строения глаза даже весьма существенные его недостатки не влияют на качество видения.

ОС глаза не является ахроматической системой. Величина его продольного хроматизма положения для крайних участков видимой области спектра в среднем составляет 1,3...2 дптр. Значение 1,3 диоптрии было установлено ещё Т. Юнгом (начало XIX в.).

Однако избирательная спектральная чувствительность глаза, а также малая величина зрачка практически исключают хроматизм. В обычных условиях наблюдения мы не различаем цветные каемки вокруг предметов.

ОС глаза несвободна от сферической аберрации, но для малых размеров зрачка влияние её незначительно. Влияние сказывается только в сумерках, когда размеры зрачка велики, при этом изображения предметов не только малоконтрастны, но и нерезки. В отличие от обычной ОС в глазу сферическая аберрация частично компенсируется во-первых благодаря тому, что периферические зоны ОС глаза имеют более слабую рефракцию (меньшую оптическую силу) из-за меньшего значения показателя преломления периферических зон хрусталика по сравнению с его ядром, во-вторых, благодаря некоторому увеличению радиусов кривизны периферической части роговицы.

Сферическая аберрация зависит от аккомодации и увеличивается с ростом аккомодационного напряжения.

С уменьшением диаметра зрачка увеличивается диаметр дифракционного кружка рассеяния. Однако при этом сферическая aberrация уменьшается. Поэтому из-за такой обратной зависимости наилучшие условия для наиболее четкого наблюдения объектов получаем при диаметре зрачка 2...4 мм.

Кома ОС глаза и децентрировка ее элементов невелики, и качество изображения не ухудшают. Влияние кривизны изображения и дисторсии мало, поскольку изображение строится на сферической поверхности сетчатки.

Глазу присуща такая aberrация, как физиологический астигматизм. Под физиологическим астигматизмом понимают такой астигматизм глаза, при котором сохраняется нормальная острота глаза. Физиологический астигматизм свойственен каждому глазу и вызван следующими причинами: асферичностью преломляющих поверхностей, астигматизмом косых (косо падающих) лучей, децентрированием преломляющих поверхностей и неравномерностью оптической плотности преломляющих сред.

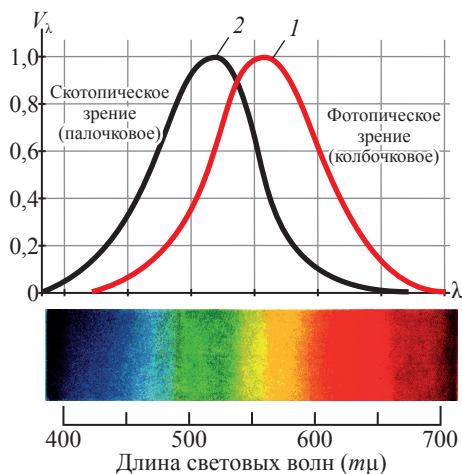
Экспериментально установлена зависимость между степенью физиологического астигматизма и остротой центрального зрения. Чем меньше физиологический астигматизм, тем выше острота зрения. Эта закономерность справедлива для остроты зрения в диапазоне 1,0...2,0, т.е. для большинства нормальных глаз.

Оптическая система глаза не является идеальной, но величины монохроматических aberrаций в пределах поля зрения, ограниченного макулой (жёлтым пятном), т.е. в области прямого зрения настолько малы, что не ухудшают качество изображения и не влияют на разрешающую способность глаза. В исследованиях А.В. Луизова показано, что не aberrации глаза, а главным образом дифракция света на зрачке глаза ограничивает остроту зрения.

## Спектральная чувствительность глаза

Глаз реагирует на поток  $\Phi_v$  в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda = 380...750$  нм.

Спектральное распределение чувствительности глаза зависит от вида адаптации. Это распределение характеризуется функцией видности  $V_\lambda$  — относительной спектральной световой эффективностью  $V_\lambda = f(\lambda)$ . Эта величина нормирована: за единицу принята чувствительность при длине волны  $\lambda$ , соответствующей



**Рис. 41. Кривые спектральной чувствительности глаза:**

1 — при яркости  $100 \text{ кд/м}^2$ ; 2 — при яркости  $10^{-4} \text{ кд/м}^2$ . При промежуточных значениях яркости адаптации в зрительном процессе участвуют и палочки, и колбочки [21]

максимальной чувствительности глаза. Значения относительной спектральной световой эффективности излучения стандартизованы Международной комиссией по освещению (МКО) как для фотопического, так и для скотопического зрения по яркости, зависящей от участия в процессе зрения только колбочек или только палочек.

Функция видности  $V_\lambda = K_\lambda / K_m$ , где  $K_\lambda$  — спектральная световая эффективность;  $K_m = 683 \text{ лм/Вт}$  при  $\lambda_{\text{max}} = 555 \text{ нм}$ . Кривые зависимости  $V_\lambda = f(\lambda)$  приведены на рис. 41.

При дневном зрении с участием только колбочек максимум световой чувствительности соответствует  $\lambda = 555 \text{ нм}$ , а при ночном зрении с участием только палочек максимум чувствительности смещается в коротковолновую область, сине-фиолетовую часть спектра и соответствует  $510 \text{ нм}$  (точнее,  $507 \text{ нм}$ ).

Этим объясняется явление, или эффект Пу р к и н ь е: при сумеречном освещении синие и зелёные предметы кажутся более светлыми, чем красные и жёлтые.

### Разрешающая способность. Угловой предел разрешения глаза

Разрешающая способность глаза — способность глаза различать (разрешать) две близкорасположенные точки с минимальным расстоянием между ними. Разрешающая способность оценивается угловым пределом разрешения  $\Psi_{\text{гл}}$ .

Если  $D_{\text{гл}} = 1,5 \dots 2,5 \text{ мм}$ , то глаз — идеальная оптическая система и  $\Psi_{\text{гл}} = 140'' / D_{\text{гл}}$ , т.е.  $\Psi_{\text{гл}} \approx 60'' \approx 1'$  (тот же результат получим, если рассматривать размер колбочки — диаметр  $5 \text{ мкм}$  — в пределах пятна сетчатки (макулы, желтого пятна).

Каждая клетка (колбочка) (см. рис. 36) может воспринимать одно-



временно лишь одно зрительное восприятие. Если засвечена некоторая часть клетки, то клетка реагирует вся целиком. Если изображения  $A$  и  $B$  двух источников света (звёзд) попадают на одну ячейку, то глаз различить их не сможет. Но даже если изображения двух звёзд  $C$  и  $D$  падают на соседние клетки, глаз не в состоянии видеть их раздельно. Только если между двумя засвеченными колбочками находится по крайней мере одна незасвеченная, то точки  $E$  и  $F$  представляются глазу видимыми раздельно. Отсюда следует, что наименьшее расстояние между двумя изображениями двух точек на сетчатке, при котором они находятся на пределе разрешения, должно быть равно диаметру колбочки  $0,005$  мм.

Если  $D_{\text{гл}} \geq 3,5$  мм, разрешающая способность падает из-за аберраций глаза. Если  $D_{\text{гл}} \approx 1$  мм, то угловой предел разрешения  $\Psi_{\text{гл}}$  определяется дифракцией и резко падает.

$\Psi_{\text{гл}}$  зависит от условий наблюдения изображений:

на экране: .....  $\Psi_{\text{гл}} = 2 \dots 3'$

в обычный ОП: .....  $\Psi_{\text{гл}} = 1'$

в высокоточный ОП: .....  $\Psi_{\text{гл}} = 30''$

в дальномер: .....  $\Psi_{\text{гл}} = 10''$ .

$\Psi_{\text{гл}}$  максимален, если  $E=50 \dots 200$  лк,  $K=1$ ,  $\lambda=0,55$  мкм.

## Острота зрения

Под остротой зрения понимают способность глаза человека видеть раздельно два предмета, расположенных близко друг от друга. Острота зрения (ОЗ) — величина, обратная угловому пределу разрешения, выраженному в минутах. Выше был рассмотрен угловой предел  $\Psi_{\text{гл}}$  разрешения.

ОЗ  $V=1/\Psi_{\text{гл}}$ , где  $\Psi_{\text{гл}}$  выражается в угловых минутах. Например, если  $\Psi_{\text{гл}} = 2'$ , то  $V=0,5$ . Есть люди, обладающие очень большой ОЗ  $V>3$ .

В ОЗ лежит контрастная чувствительность глаза. Если яркостный контраст ниже порогового, то объекты неразличимы независимо от их размеров и в этом случае  $V=0$ .

ОЗ, определяемая в основном диаметром колбочек, зависит от многих факторов.

1. От контраста предмета  $K_{\text{п}} = \frac{E_{\text{п}} - E_{\text{ф}}}{E_{\text{п}} + E_{\text{ф}}}$ , где  $E_{\text{п}}$  и  $E_{\text{ф}}$  соответственно освещённость предмета и освещённость фона. Острота зрения более

или менее пропорциональна величине  $K$ , если она мало отличается от единицы.

2. От освещённости в поле наблюдения. При наблюдении тёмных предметов на светлом поле наибольшая ОЗ наблюдается в пределах освещённости от 50 до 200 лк, а при наблюдении светлых предметов на тёмном фоне — от 5 до 10 лк (темновая адаптация глаза).

3. От диаметра зрачка глаза  $D_{\text{гл}}$ . С величиной  $D_{\text{гл}}$  связан диаметр  $\delta$  дифракционного пятна рассеяния на сетчатке  $\delta = \frac{1,22\lambda}{D_{\text{гл}}} f_{\text{гл}}$ , где  $f_{\text{гл}}$  — переднее фокусное расстояние глаза.

При наименьшем (без прибора) диаметре зрачка глаза  $D_{\text{гл}} = 2$  мм,  $\lambda = 0,5$  мкм и  $f_{\text{гл}} = 17$  мм находим  $\delta = 5$  мкм, т.е. диаметр кружка рассеяния равен диаметру колбочки. При увеличении  $D_{\text{гл}}$  величина  $\delta$  уменьшается, но ОЗ при этом не повышается, так как она лимитируется размером колбочек сетчатки. Если глаз работает с ОП, диаметр  $D'$  выходного зрачка меньше 2 мм, величина становится больше 5 мкм и разрешающая способность глаза уменьшается.

4. От места изображения на сетчатке. При удалении от центральной ямки жёлтого пятна ОЗ падает очень резко.

5. От длины волны  $\lambda$  света. Максимальная разрешающая способность наблюдается при  $\lambda = 0,56$  мкм.

6. От дефектов зрения. Близорукость, дальнозоркость, особенно астигматизм существенно снижают ОЗ. Сюда же относятся aberrации ОС глаза. Их влияние, однако, незначительно и обычно не обнаруживается.

В устройствах для отсчёта по шкалам иногда возможно создать условия, способствующие повышению остроты зрения. Так, нониальное совмещение двух штрихов может быть выполнено с погрешностью  $10''$ . Следовательно, ОЗ при этом оказывается в 6 раз выше обычной. Объяснить это можно тем, что изображения  $KL$  и  $MN$  (см. рис. 36) двух штрихов на сетчатке попадают на два разных ряда колбочек даже в том случае, если величина сдвига  $\delta_1$  значительно меньше диаметра колбочки. С такой же повышенной ОЗ глаз человека производит установку по биссектору, когда штрих шкалы устанавливается в середине между двумя параллельными штрихами индекса.

#### 4.4. Субъективная яркость изображения

Субъективная яркость изображения при наблюдении невооруженным глазом — степень раздражения, вызываемая светом, попадающим в глаз.

Если предмет точечный — субъективная яркость определяется световым потоком  $d\Phi$  и зависит от расстояния  $s_1$ ,  $d\Phi = \pi D_{\text{гл}}^2 I / (4s_1^2)$  — в этом случае площадь изображения  $S_{\text{изобр}} < S_{\text{пн}}$  площади светочувствительного элемента.

Если предмет конечных размеров — субъективная яркость определяется освещённостью изображения на сетчатке и не зависит от расстояния  $s_1$ :  $E' = ((\pi \tau_{\text{гл}}^2 L_{\text{об}}) / 4) (D_{\text{гл}} / f'_{\text{гл}})^2$ , [лк], где  $\tau_{\text{гл}} \approx 0,75$ ,  $L_{\text{об}}$  — яркость предмета (объекта).

#### 4.5. Недостатки глаза

Эмметропия — физиологически наиболее совершенный нормальный вид рефракции глаза, в отличие от гиперметропии и миопии.

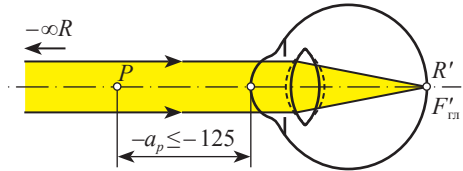


Рис. 42. Эмметропический глаз ( $P$  — ближайшая точка ясного видения) [20]

Эмметропический

(нормальный) глаз, если дальняя точка — в бесконечности,  $s_{\text{д}} = -\infty$ . В этом случае изображение располагается на сетчатке в точке  $F'_{\text{гл}}$  (рис. 42).

Глаз, неудовлетворяющий этому условию, называется аметропическим.

Аметропические глаза показаны на рис. 43, а и б. Все виды аметропии приведены на рис. 44.

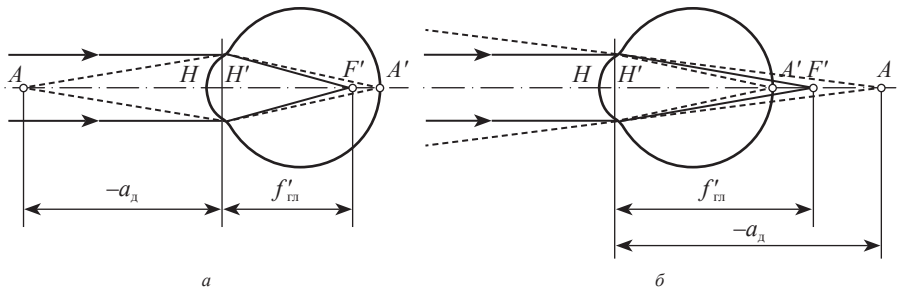
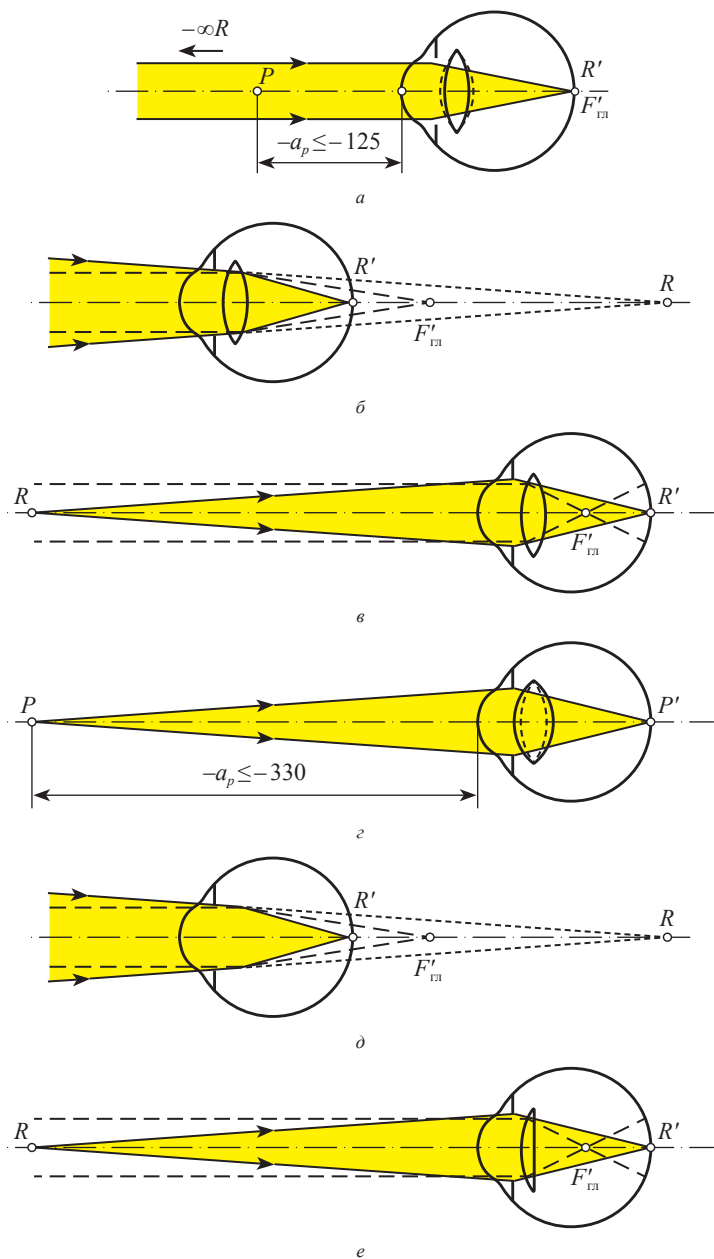


Рис. 43. Аметропические глаза:

а — миопический (близорукий)  $s_{\text{д}}(a_{\text{д}}) = -$  (перед глазом); б — гиперметропический (дальнозоркий)  $s_{\text{д}}(a_{\text{д}}) = +$  (сзади глаза)



**Рис. 44. Виды аметропии [20]:**

*a* — эмметропия; *b* — гиперметропия; *в* — миопия; *г* — пресбиопия; *д* — афакция; *e* — артрифакция

На рис. 44 кроме описанных видов аметропии показаны:  
 пр е с б и о п и я, т.е. старческая дальнозоркость;  
 а ф а к и я — отсутствие хрусталика;  
 а р т и ф а к и я — глаз с искусственным хрусталиком.

На практике реализована оптическая система «афакичный глаз + интродокулярная линза» (артифакция).

Аметропия возникает за счет:

неправильной длины глазного яблока;  
 неправильного положения хрусталика;  
 асферической формы преломляющих поверхностей (неправильности формы роговицы или хрусталика);  
 несимметричностью поверхностей относительно оси глаза.

А с т и г м а т и ч е с к и й — глаз, у которого аметропия различна в двух меридиональных сечениях. Этот недостаток зрения называют **глазным астигматизмом** (или **физиологическим**) (не следует путать с астигматизмом узких наклонных пучков в ОС).

Чаще всего встречается **астигматизм роговицы глаза**, заключающийся в том, что в разных меридиональных сечениях радиус кривизны роговицы имеет различные значения. Поэтому аметропия глаза различна в разных сечениях. При этом существуют два взаимно перпендикулярных плоскости, называемые главными меридиональными плоскостями, в которых аметропия имеет экстремальные значения (в одном — минимальное, в другом — максимальное).

Реже встречается астигматизм глаза, вызванный **неправильностью формы преломляющих поверхностей хрусталика**.

## 4.6. Коррекция недостатков зрения

Для близорукого (миопического) глаза (рис. 45, а) используют отрицательную линзу (рис. 45, б); для дальнозоркого (рис. 45, в) — положительную (рис. 45, з).

Оптическая сила системы «линза + глаз»:

$$\Phi_{л} + \Phi_{гл} - d\Phi_{л}\Phi_{гл} = \Phi_{л+гл}, \text{ где все } \Phi \text{ в дптр; если } d = -f_{гл}, \text{ то } f'_{л} = s_{д} + d.$$

А м е т р о п и я г л а з а выражается в диоптриях (дптр):  $A_{гл} = 1000/s_{д}$  и тогда оптическая сила корригирующей линзы (рефракция линзы)

$$\Phi_{л} = 1000/f'_{л} = A_{гл}(1 + A/(1000d)).$$

При использовании контактных линз  $d = 0$  и  $\Phi_{л} = A_{гл}$ .

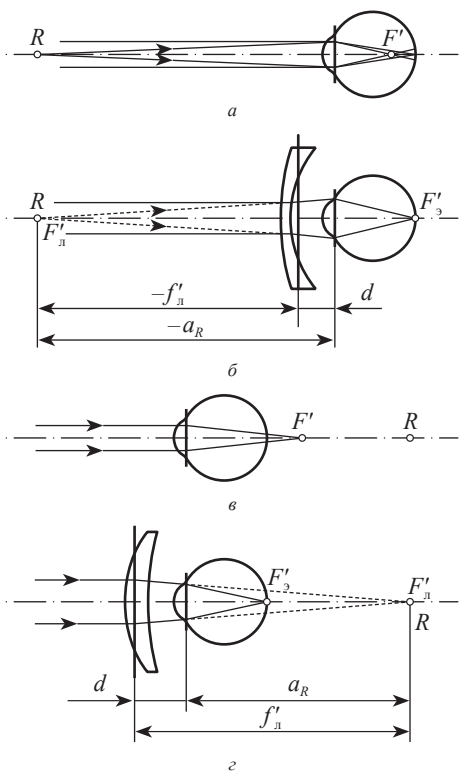


Рис. 45. Принцип исправления аметропии глаза очковой линзой

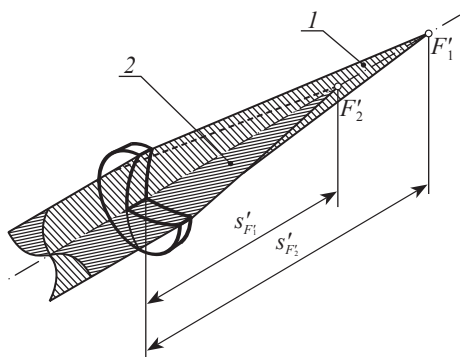


Рис. 46. Астигматическая линза:

1 — первое главное сечение; 2 — второе главное сечение;

С возрастом уменьшаются пределы аккомодации — появляется возрастная дальнозоркость — пресбиопия — старческое ослабление аккомодации глаза, вызванное потерей эластичности хрусталика.

Для коррекции аметропии астигматического глаза очковая линза должна обладать в двух главных меридиональных сечениях различной рефракцией. Такой результат достигается применением цилиндрических, а ещё лучше — торических преломляющих поверхностей.

В отличие от стигматической, астигматическая линза (условное обозначение А) имеет в параксиальной области два фокуса для двух взаимно перпендикулярных плоских сечений падающего пучка (рис. 46).

Эти сечения линзы, содержащие оптическую ось и в которых задняя вершинная рефракция принимает максимальное и минимальное значения, называются главными меридиональными сечениями астигматической линзы. Если на линзу падает цилиндрический пучок параллельных лучей, то вместо точек  $F'_1$  и  $F'_2$  образуются фокальные линии, ориентиро-

ванные взаимно перпендикулярно. Для определенности различают первое и второе главные сечения астигматической линзы.

Первое главное меридиональное сечение астигматической линзы — главное сечение, в котором задняя вершинная рефракция принимает наименьшее по алгебраической величине значение.

Второе главное меридиональное сечение астигматической линзы — главное сечение, в котором задняя вершинная рефракция принимает наибольшее алгебраическое значение.)

Исправление астигматизма производится, если рефракция глаз для двух главных сечений различается на 0,25 дптр и более.

Применяются плоскоцилиндрические линзы, а также торические (бочкообразные) линзы, которые могут быть плоско-торическими и торо-торическими (когда обе поверхности линзы — торические).

#### 4.7. Стереоскопическое зрение

При наблюдении двумя глазами два изображения одного и того же объекта соединяются в одно — пространственное изображение (нет двоения). Однако при этом должны быть выполнены определенные геометрические условия.

Это обеспечивается за счет конвергенции при выполнении условия, что изображения получаются на определённых участках сетчатки.

Биноклярное зрение — способность обеих глаз соединять два изображения одного предмета в единый зрительный образ.

Стереоскопическое зрение — способность трёхмерного восприятия пространства при наблюдении двумя глазами [3].

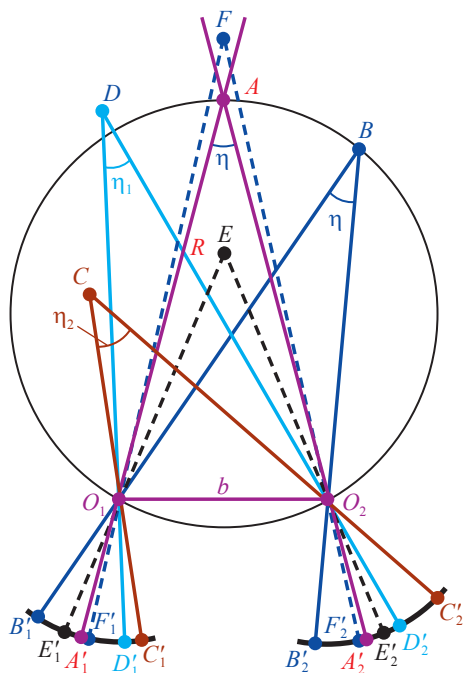
При визировании на точку  $A$  (рис. 47) мы поворачиваем оба глаза так, что линии прямого видения пересекутся в  $t.A$  — наблюдаемой точке, изображения  $A'_1$  и  $A'_2$  окажутся в фовеолах (центральных ямках). На рисунке точки  $O_1$  и  $O_2$  — центры вращения глаз,  $O_1O_2$  — глазной базис, дуги  $B'_1C'_1$  и  $B'_2C'_2$  — сетчатки глаз. Угол  $O_1AO_2 = \eta$  — стереоскопический параллакс (угол конвергенции).

В зависимости от удаления точки фиксации  $A$  от базиса величина стереоскопического параллакса изменяется от нуля, когда точка  $A$  лежит в бесконечности, до  $15^\circ$ , когда она находится на расстоянии 250 мм — расстоянии наилучшего видения. Кроме  $t.A$  возьмем в пространстве ряд точек  $B, C, D, E, F$ . При рассмотрении точек

$E, F$ , находящихся внутри угла  $\eta$  или внутри соответствующего ему вертикального угла  $\eta$ , мы видим их двойными. Обратим внимание на то, что изображения точек  $E$  и  $F$  на сетчатках глаз ( $E'_1E'_2$  и  $F'_1F'_2$ ) лежат по разные стороны от  $A'_1$  и  $A'_2$ .

Изображения же точек  $B, C, D$ , находящихся вне угла  $\eta$ , мы видим как одиночные. Заметим, что изображения точек  $B, C, D$  на сетчатках глаз, т.е.  $B'_1$  и  $B'_2, C'_1$  и  $C'_2, D'_1$  и  $D'_2$  лежат по одну сторону от фовеол  $A'_1$  и  $A'_2$ .

Точки сетчатых оболочек, воспринимающие изображения одной и той же точки пространства, которые могут быть соединяемы в представление одной точки, называются соответственными (корреспондирующими, или компаратными, или идентичными). Они имеют одинаковый стереоскопический параллакс  $\eta$ .



**Рис. 47. К объяснению стереоскопического зрения:**

$\eta = \frac{b}{R}$ ;  $O_1, O_2$  — центры вращения глаз;  
 $O_1O_2 = b$  — глазной базис

Соответственные точки сетчатки так связаны между собой посредством нервных путей, что зрительное раздражение в них соединяется в одно зрительное восприятие.

Геометрическое место точек пространства, которые мы видим одновременно одиночными, называется гороптером. Гороптер меняется при изменении фиксации обеих глаз в пространстве. Благодаря большой подвижности глаз точки фиксации непрерывно меняются, и мы не замечаем, что часть точек пространства при данной фиксации видим двойными.

На рис. 47 окружность, проведенная через точки  $A, O_1$  и  $O_2$ , является геометрическим местом точек с одинаковым стереоскопическим параллаксом  $\eta$ .



Базис  $b$  мал по сравнению с расстоянием  $R$  до точки  $A$ , поэтому можно записать:  $\eta = b/R$ .

Примем, что дуги  $A'_1B'_1$  и  $A'_2B'_2$  положительны, если точки  $B'_1$  и  $B'_2$  расположены вправо от точек  $A'_1$  и  $A'_2$  и отрицательны, если расположены влево от точек  $A'_1$  и  $A'_2$ .

Рассмотрим точки  $C$  и  $D$ , расположенные ближе и дальше точки  $A$ . Для точки  $C$ , лежащей ближе к базису, разность  $\Delta\eta_2 = \eta - \eta_2 < 0$  измеряется разностью дуг  $C'_1A'_1 - C'_2A'_2 < 0$ .

Для точки  $D$ , более удаленной от базиса, разности параллаксов  $\Delta\eta_1 = \eta - \eta_1 > 0$  и разность дуг  $D'_1A'_1 - D'_2A'_2 > 0$ .

Глаза способны воспринимать разность дуг, благодаря чему наблюдатель чувствует положение точек по глубине.

Точки  $C'_1$  и  $C'_2$ ,  $D'_1$  и  $D'_2$ , расположенные на сетчатке на разных расстояниях от фовеол (центральных ямок на пятне сетчатки) ( $A'_1C'_1 \neq A'_2C'_2$ ,  $D'_1A'_1 \neq D'_2A'_2$ ), называются диспаратными точками сетчатки. Если разность дуг на сетчатке меньше нуля, то наблюдаемые точки ближе к наблюдателю (менее удалены), а если больше нуля — более удалены.

Точки, имеющие положительную разность стереоскопических параллаксов ( $\Delta\eta_1 > 0$  для т.  $D$ ) кажутся более удаленными. Точки, имеющие отрицательную разность параллаксов ( $\Delta\eta_2 < 0$ ) кажутся менее удаленными.

Разность  $\Delta\eta$  характеризует диспаратность точек на сетчатке. В результате человек получает от рассматриваемых предметов пространственное впечатление, называемое стереоскопическим эффектом. Способность глаза воспринимать минимальные разности параллаксов — разности в положении точек в пространстве по глубине — называется остротой стереоскопического видения (зрения) (ОСВ).

ОСВ определяется наименьшей разностью параллаксов  $\Delta\eta$ , которая ещё может быть осуществлена глазами. Она принимается равной от  $10''$  до  $30''$ . Если принять  $\Delta\eta = 10''$  и  $b = 65$  мм, то

$$R_{\max} = b/\Delta\eta = 65 \cdot 206265 / 10'' = 1340 \text{ м,}$$

где  $R_{\max}$  — радиус стереоскопического видения (зрения).

Точки пространства, находящиеся на расстоянии, большем  $R_{\max}$ , представляются лежащими в одной плоскости.

ОСВ зависит от расстояния до рассматриваемых точек.

#### 4.8. Требования к оптической системе, работающей совместно с глазом. Согласование параметров глаза и оптических систем

1. Изображение, образованное ОС, должно находиться в пределах объема аккомодации глаза (11дптр) от  $\infty$  до 92 мм. Лучше, если из ОС выйдет параллельный пучок лучей — это обеспечивает наблюдение без напряжения мышц глаза;

2. Положение и размер выходного зрачка ОС должны быть согласованы с  $D_{\text{гл}}$  наблюдателя:

диаметр выходного зрачка ОС от 2 до 4 мм для ОП, работающих днём;

диаметр выходного зрачка ОС от 4 до 7 мм для ОП, работающих в сумеречных условиях.

удаление выходного зрачка от заднего торца оправы — не менее 8–10 мм из условия совмещения выходного зрачка ОС со зрачком глаза (если ОС — неширокоугольная).

3. Визуальные ОС проектируются на нормальное зрение, поэтому для удобства работы наблюдателя с различным зрением окуляры должны перемещаться вдоль оси для изменения структуры выходящих из ОС пучков лучей.

4. Диоптрийная подвижка  $\Delta$  окуляра

$$\Delta = A f_{\text{ок}}'^2 / 1000; \text{ если } A = \pm 5 \text{ дптр, } f_{\text{ок}}' = 20 \text{ мм, то } \Delta = \pm 2 \text{ мм.}$$

5. Разрешающая способность ОС должна быть согласована с разрешающей способностью глаза.

При $K=1$	$2\omega = 2^\circ$	$\psi'_{\text{гл}} = 1'$
При $K=0,2 \dots 0,8$	$2\omega = 2^\circ$	$\psi'_{\text{гл}} = 2,5' \text{ до } 1,5';$
	$2\omega = 5^\circ$	$\psi'_{\text{гл}} = 3,3';$
	$2\omega = 10^\circ$	$\psi'_{\text{гл}} = 5';$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Запругаева Л.А., Свешникова И.С.* Расчёт и проектирование оптических систем. Учебник для вузов. В двух частях. Часть 1, 2-е изд. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2009. –350 с.
2. *Гуриков В.А.* История прикладной оптики. М.: Наука,1993. –176 с.
3. *Дубовик А.С., Апенко М.И., Дурейко Г.В.* и др. Прикладная оптика М.: Недра, 1982. –612 с.
4. *Физический энциклопедический словарь* / Гл.ред. А.М. Прохоров М.: Советская Энциклопедия, 1983. –928 с.
5. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. –856 с.
6. *Зверев В.А., Латышев С.М., Тимощук И.Н.* Исторический аспект открытия закона преломления. Сб. трудов XI Международной конференции «Прикладная оптика –2014». Том 4, секция 3. –С. 21–22.
7. *Гуриков В.А.* Становление прикладной оптики. XV – XIX века. М.: Наука, –1985.
8. *Можаров Г.А.* Основы геометрической оптики. М.: Логос, 2006. –280 с.
9. *Прикладная оптика* / А.С.Дубовик, М.И.Апенко, Г.В.Дурейко и др. М.:Машиностроение, 1992. –480 с.
10. *Погорельский С.А.* Прикладная оптика: курс лекций. Тула , Изд-во ТулГУ, 2010. –253 с.
11. *Чуриловский В.Н.* Теория оптических приборов. М.-Л: Машиностроение, 1966. –564с
12. *Заказнов Н.П., Кирюшин С.Н., Кузичев В.И.* Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. –448 с.
13. *Основы оптики:* Конспект лекций. Под ред. Шехонина А.А. –СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. –156 с.
14. *Марешаль А., Франсон М.* Структура оптического изображения, пер. с франц., М.: Мир, 1964. –295 с.
15. *Тудоровский А.И.* Теория оптических приборов, 2-е изд., часть I. Изд. АН СССР, 1948. –452 с.
16. *Шульман М.Я.* Измерение передаточных функций оптических систем. –Л.: Машиностроение, 1980. –208 с.
17. *Зверев В.А.* Введение в оплотехнику проектирования оптических приборов: Уч.пособие. –СПб.: СПб ГИТМО, 1995. –104 с.
18. *Курепина М.М., Воккен Г.Г.* Анатомия человека: Учебник для биол. фак. пед. ин-тов – 4-е изд.-М.: Просвещение, 1979. 304 с + Атлас 3-е изд.(128 с.)
19. *Цуканова Г.И.* Прикладная оптика: Конспект лекций. Часть 1. СПб: СПбГУ ИТМО, 2002 .–156 с.
20. *Черкасова Д.Н.,Бахолдин А.В.* Офтальмологические оптические приборы: Учебное пособие. Часть I. –СПб: СПбГУ ИТМО, 2010
21. *Грегори Р.Л.* Глаз и мозг. / Пер. с англ. М.: Прогресс, 1970. –272 с.
22. *Словарь иностранных слов* . 15-е изд. М.: Русский язык,1988. –609 с.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Показатель преломления  $n_e$  и коэффициент дисперсии  $\nu_e$   
оптических стекол (из ГОСТ 3514-94)

Марка стекла	$n_e$	$\nu_e$	Марка стекла	$n_e$	$\nu_e$	Марка стекла	$n_e$	$\nu_e$
Легкие кроны ЛК			Баритовые кроны БК			Сверхтяжелые кроны СТК		
ЛК1	1,4414	68,54	БК4	1,5324	60,23	СТК3	1,6622	57,09
ЛК3	1,4891	69,87	БК104	1,5324	60,23	СТК103	1,6622	57,09
ЛК103	1,4891	69,87	БК6*	1,5421	59,38	(СТК7)	1,6901	53,33
ЛК4	1,4922	64,93	БК106*	1,5421	59,38	СТК8	1,7065	49,41
ЛК5	1,4799	65,47	БК8*	1,5489	62,59	СТК9	1,7460	50,00
ЛК105	1,4799	65,47	БК108*	1,5489	62,59	(СТК10)	1,7416	47,88
ЛК6*	1,4721	66,68	БК10*	1,5713	55,79	СТК12	1,6950	54,81
ЛК7*	1,4846	66,20	БК110*	1,5713	55,79	СТК112	1,6950	54,81
ЛК107	1,4853	66,21	БК13	1,5617	60,92	СТК15	1,7124	54,55
(ЛК8)	1,4725	68,38	БК114	1,5320	61,08	СТК16	1,7900	45,35
Фосфатные кроны ФК			Тяжелые кроны ТК			СТК19	1,7476	50,21
ФК11	1,5218	68,92	ТК2*	1,5749	57,20	СТК119	1,7476	50,21
ФК13	1,5488	67,42	ТК102*	1,5749	57,20	(СТК20)	1,7685	50,30
ФК14	1,5821	64,82	ТК4	1,6138	55,55	Особые кроны ОК		
ФК24	1,5837	64,50	ТК104	1,6138	55,55	ОК1	1,5239	75,93
Тяжелый фосфатный крон ТФК			ТК8	1,6168	54,83	ОК2	1,5521	72,64
ТФК11	1,6038	65,84	ТК108	1,6168	54,83	ОК3	1,4419	92,00
Кроны К			(ТК9)	1,6199	53,76	ОК4	1,4485	91,90
(К1)	1,5001	64,95	ТК12	1,5710	62,68	Кронфлинты КФ		
К2	1,5023	65,83	ТК112	1,5710	62,68	(КФ1)	1,5176	54,20
К102	1,5023	65,75	ТК13	1,6063	60,39	КФ4*	1,5203	58,72
(К3)	1,5120	63,13	ТК113	1,6063	60,39	КФ104	1,5203	58,72
К8*	1,5183	63,83	ТК14*	1,6155	60,34	КФ6	1,5027	56,99
К108*	1,5183	63,83	ТК114*	1,6155	60,34	КФ7	1,5200	50,88
К100*	1,5237	59,38	ТК16*	1,6152	58,09	Баритовые флинты БФ		
К110	1,5264	59,01	ТК116*	1,6152	58,09	БФ1	1,5271	54,68
К14	1,5168	60,37	ТК17	1,6305	59,09	БФ101	1,5271	54,68
К114	1,5168	60,37	ТК20*	1,6247	56,43	БФ4	1,5505	53,66
К15	1,5359	55,19	ТК120*	1,6247	56,43	БФ104	1,5505	53,76
К19	1,5208	61,41	ТК21*	1,6600	50,81	БФ6	1,5724	49,18
К119	1,5208	61,41	ТК121*	1,6600	50,81	БФ106	1,5724	49,18
(К20)	1,5285	59,92	ТК23*	1,5915	61,98	БФ7	1,5822	53,56
			ТК123	1,5911	60,68	БФ107	1,5822	53,56
			ТК125	1,5930	57,57	БФ8	1,5857	46,15
			ТК134	1,6139	55,66			

Марка стекла	$n_e$	$v_e$	Марка стекла	$n_e$	$v_e$	Марка стекла	$n_e$	$v_e$
Баритовые флинты БФ			Легкие флинты ЛФ			ТФ3*	1,7232	29,29
БФ108	1,5857	46,15	ЛФ5*	1,5783		ТФ103	1,7237	29,31
БФ11	1,6251	52,84	ЛФ105*	1,5783	41,04	ТФ4	1,7462	27,95
БФ111	1,6251	52,84	(ЛФ7)	1,5818	40,83	ТФ104	1,7462	28,03
БФ12*	1,6298	38,83	ЛФ9	1,5837	37,73	ТФ5*	1,7617	27,32
БФ112*	1,6298	38,83	ЛФ10	1,5509	45,57	ТФ105*	1,7617	27,32
БФ13	1,6428	47,97	ЛФ11	1,5638	46,52	ТФ7	1,7343	28,12
БФ113	1,6428	47,97	ЛФ111	1,5638	46,52	ТФ107	1,7343	28,12
БФ16*	1,6744	47,00	ЛФ12	1,5430	44,55	ТФ8	1,6947	30,89
БФ21	1,6178	39,76	Флинты Ф			ТФ108	1,6947	30,89
БФ121	1,6178	39,76	Ф1*	1,6169	36,70	ТФ10	1,8138	25,17
БФ123	1,6429	48,01	Ф101*	1,6179	36,76	ТФ110	1,8138	25,17
БФ24*	1,6386	36,49	Ф2	1,6205	36,35	(ТФ11)	1,6536	31,33
БФ25	1,6108	45,82	Ф102	1,6210	36,38	ТФ12	1,7924	25,46
БФ125	1,6108	45,82	Ф4	1,6285	35,67	ТФ13	1,7917	26,13
(БФ26)	1,6546	38,19	Ф104*	1,6290	35,72	ТФ14	1,6973	28,57
БФ27	1,6101	43,67	Ф6*	1,6070	37,68	ТФ15	1,7766	25,76
БФ28	1,6687	35,20	Ф106	1,6070	37,82	ТФ21	1,6535	31,34
(БФ32)	1,5824	46,41	Ф8	1,6291	35,30	Сверхтяжелые флинты СТФ		
Тяжелые баритовые флинты ТБФ			Ф108	1,6296	35,35	(СТФ2)	1,9554	20,26
			Ф109	1,6180	34,31	СТФ3	2,1863	16,89
			Ф13	1,6184	34,35	(СТФ11)	2,0711	16,50
			Ф18	1,6241	36,07	Особые флинты ОФ		
			Ф113	1,6246	36,12	ОФ1	1,5319	51,54
			Ф20	1,6292	35,03	ОФ101	1,5319	51,54
			Тяжелые флинты ТФ			ОФ3)	1,6157	43,88
			ТФ1*	1,6522	33,62	ОФ4	1,6541	43,23
			ТФ101*	1,6522	33,62	(ОФ5)	1,6664	41,57
			ТФ2	1,6776	31,99	ОФ6	1,6040	50,84
ТФ102	1,6776	31,99	ОФ7	1,6032	47,50			
			ОФ8	1,6547	42,96			
			ОФ9	1,7258	35,01			

\*Предпочтительно

*Примечание:* стекла марок, заключенных в скобки, при новых разработках к применению не допускаются.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

**Оптические постоянные стекол (каталог СССР - ГДР) которых нет в ГОСТ 13659-78**

Марка стекла	$n_e$	$v_e$	$n_F - n_C$	$n_F$	$n_C$
<b>Легкие кроны</b>					
ЛК1	1,441382	68,57	0,006437	1,444650	1,438213
ЛК5	1,479902	65,44	0,007334	1,483601	1,476267
ЛК8	1,472489	68,36	0,006912	1,475982	1,469069
<b>Фосфатные кроны</b>					
ФК11	1,521759	68,93	0,007570	1,525594	1,518024
ФК13	1,548807	67,39	0,008143	1,552923	1,544779
<b>Кроны</b>					
К2	1,502275	65,84	0,007629	1,506130	1,498501
К3	1,511993	63,14	0,008109	1,516106	1,507997
К100	1,523669	59,34	0,008825	1,528174	1,519349
К15	1,535877	55,18	0,009711	1,540851	1,531140
К20	1,528467	59,90	0,008822	1,532962	1,524139
<b>Тяжелые кроны</b>					
ТК9	1,619926	53,76	0,011531	1,625838	1,614307
<b>Сверхтяжелые кроны</b>					
СТК8	1,706497	49,41	0,014298	1,713847	1,699549
СТК15	1,712404	54,56	0,013058	1,719063	1,706005
СТК16	1,790047	45,36	0,017415	1,799020	1,781605
СТК20	1,768462	50,02	0,015362	1,776327	1,760964
<b>Особые кроны</b>					
ОК1	1,523894	75,98	0,006895	1,527403	1,520508
ОК2	1,552064	72,71	0,007590	1,555930	1,548338
<b>Баритовые флинты</b>					
БФ4	1,550505	53,66	0,010259	1,555768	1,545510
БФ26	1,654560	38,20	0,017136	1,663491	1,646355
БФ27	1,610095	43,68	0,013967	1,617338	1,603372
БФ32	1,582358	46,40	0,012549	1,588836	1,576286
<b>Тяжелые баритовые флинты</b>					
ТБФ3	1,760210	40,87	0,018601	1,769868	1,751267
ТБФ8	1,864057	36,40	0,023736	1,876420	1,852684
ТБФ9	1,812961	42,52	0,019118	1,822844	1,803726
ТБФ10	1,820573	33,17	0,024740	1,833550	1,808810
ТБФ11	1,837367	42,83	0,019550	1,847468	1,827918
ТБФ25	1,817531	37,21	0,021973	1,828973	1,806999
<b>Легкие флинты</b>					
ЛФ7	1,581756	40,83	0,014247	1,589157	1,574910
ЛФ11	1,563758	46,50	0,012123	1,570014	1,557891
ЛФ12	1,543062	44,57	0,012185	1,549373	1,537188

## Окончание таблицы Приложения 2

Флинты					
Ф2	1,620543	36,35	0,017072	1,629444	1,612372
Ф18	1,629151	35,03	0,017962	1,638549	1,620586
Тяжелые флинты					
ТФ11	1,653620	31,34	0,020858	1,664614	1,643756
ТФ12	1,792379	25,46	0,031124	1,808891	1,777767
ТФ13	1,791689	26,13	0,030299	1,807717	1,777417
Сверхтяжелые флинты					
СТФ2	1,955369	20,26	0,047160	1,980606	1,933446
СТФ3	2,186260	16,89	0,070221	2,224197	2,153976
СТФ11	2,071082	16,50	0,064910	2,106220	2,041311
Особые флинты					
ОФ3	1,615734	43,88	0,014031	1,622945	1,608914
ОФ5	1,666405	41,56	0,016033	1,674677	1,658644
ОФ6	1,604011	50,84	0,011880	1,610071	1,598191

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Линии Фраунгофера

**Фраунгоферовы линии** — линии поглощения в спектре Солнца. Ф.л. впервые наблюдал в 1802 г. английский физик У. Волластон, а в 1814 г они были обнаружены и подробно описаны немецким физиком Й. Фраунгофером; правильно объяснены немецким физиком Р. Кирхгофом.

Наблюдается более 20 тысяч фраунгоферовых линий в ИК, УФ и видимой областях спектра, многие из них отождествлены со спектральными линиями известных химических элементов. В таблице приведены наиболее интенсивные Ф.л. в видимой области.

Обозначение линий Фраунгофера	Длина волны $\lambda$ , нм	Цвет	Химический элемент
<i>A'</i>	766,5	Темно-красный	Калий
<i>C</i>	656,3	Красный	Водород
<i>D</i>	589,3	Желтый	Натрий
<i>d</i>	587,6	Желто-зеленый	Гелий
<i>e</i>	546,1	Зеленый	Ртуть
<i>F</i>	486,1	Зелено-голубой	Водород
<i>G'</i>	434,1	Синий	Водород
<i>h</i>	404,7	Фиолетовый	Ртуть
<i>H</i>	396,8	Темно-фиолетовый	Кальций

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Длины волн, для которых приведены значения показателей преломления марок стекол в ГОСТ 13659-78

Ультрафиолетовая область		Видимая область				Инфракрасная область	
Длина волны $\lambda$ , мкм	Обозначение линии спектра	Химический элемент	Длина волны $\lambda$ , мкм	Обозначение линии спектра	Химический элемент	Длина волны $\lambda$ , мкм	Химический элемент
06365	<i>i</i>	Hg	0,4046 <sub>6</sub>	<i>h</i>	Hg	0,800	—
			0,4358 <sub>3</sub>	<i>g</i>	Hg	0,863	—
			0,4800	<i>F'</i>	Cd	0,900	—
			0,4861 <sub>3</sub>	<i>F</i>	H	0,951	—
			0,488	—	Ar	1,000	—
			0,5460 <sub>7</sub>	<i>e</i>	Hg	1,060	Nd в стекле — He+Ne —
			0,5875 <sub>6</sub>	<i>d</i>	He	1,100	
			0,5893 <sub>0</sub>	<i>D</i>	Na	1,153	
			0,6328	—	He+Ne	от 1,2	
			0,6438	<i>C'</i>	Cd	до 2,6	
			0,6562 <sub>8</sub>	<i>C</i>	H	через 0,1	
			0,6943	—	Cr+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
			0,700	—	—		
			0,7065 <sub>2</sub>	<i>r</i>	He		



**ПРИЛОЖЕНИЕ 5**

**Значения припуска  $\Delta D$  на закрепление линзы в оправе и наименьшая толщина  $d_{\min}$  края положительной линзы (ОСТ 3 – 490 – 83)**

Световой диаметр $D_{\text{св}}$ линз, мм	Припуск $\Delta D$ на закрепление при креплении		Наименьшая толщина положительной линзы по краю $d_{\min}$	Световой диаметр $D_{\text{св}}$ линз, мм	Припуск $\Delta D$ на закрепление при креплении		Наименьшая толщина положительной линзы по краю $d_{\min}$
	завальцовкой	прижимным кольцом			завальцовкой	прижимным кольцом	
До 6	0,6	—	1,0	Св. 80 до 120	—	3,0	3,0
Св. 6 до 10	0,8	1,0	1,2	" 120 " 180	—	4,0	4,0
" 10 " 18	1,0	1,5	1,5	" 180 " 260	—	5,0	5,0
" 18 " 30	1,2	1,8	1,8	" 260 " 360	—	6,0	6,0
" 30 " 50	1,5	2,0	2,0	" 360 " 500	—	7,0	7,0
" 50 " 80	2,0	2,5	2,5				

**ПРИЛОЖЕНИЕ 6**

**Нормальные линейные размеры (к округлению полных диаметров)**

$Ra\ 5$	—							
$Ra\ 10$	—			$Ra\ 10$	—			
$Ra\ 20$	—	$Ra\ 20$	—	$Ra\ 20$	—	$Ra\ 20$	—	
$Ra\ 40$	$Ra\ 40$	$Ra\ 40$	$Ra\ 40$	$Ra\ 40$	$Ra\ 40$	$Ra\ 40$	$Ra\ 40$	
1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,3	1,4	1,5	
1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,4	
2,5	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	
4,0	4,2	4,5	4,8	5,0	5,3	5,6	6,0	
6,3	6,7	7,1	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	
10	10,5	11	11,5	12	13	14	15	
16	17	18	19	20	21	22	24	
25	26	28	30	32	34	36	38	
40	42	45	48	50	53	56	60	
63	67	71	75	80	85	90	95	
100	105	110	115	120	130	140	150	
160	170	180	190	200	210	220	240	
250	260	280	300	320	340	360	380	
400	420	450	48	500	530	560	600	
630	670	710	750	800	850	900	950	

## ИЗ ИСТОРИИ ОЧКОВОЙ ОПТИКИ

*Без истории предмета - нет теории предмета.*

**Н.Г. Чернышевский**

Линзы известны человечеству более 4500 лет, о чем свидетельствуют археологические находки. Отдельные попытки использовать природные прозрачные материалы для коррекции недостатков зрения истории известны давно. Еще древнеримский император Нерон (I в. до н.э.) приводил в трепет своих приближенных, когда подносил к глазу изумруд и пристально наблюдал за происходящим.

Лупы из горного хрусталя использовал для чтения арабский ученый средневековья Мухаммед ибн Ахмед аль-Бируни (X–XI в.). Его современник египтянин Ибн аль-Хайсам (935–1039), известный в Европе под именем Альгазен, описал строение глаза и высказал предположение, что приемником изображения является хрусталик. Точка зрения Альгазена господствовала до XVI в. Ему было известно увеличивающее действие плоско-выпуклой линзы.

Однако изобретение очков связывают с концом XIII в. Честь создания очковых линз история приписывает итальянским стекловарам, случайно обнаружившим, что капля застывшего прозрачного венецианского стекла, поднесенная к глазу, способна улучшить старческое зрение. Исторические документы, хранящиеся в библиотеке монахов-проповедников в Пизе, свидетельствуют о том, что очки начал впервые делать «некто, не желавший открыть своей тайны».

Известно также, что монах Александр де Спино, узнав об этом изобретении, стал изготавливать очки самостоятельно и охотно обучал этому мастерству желающих. Кроме того, во Флоренции в церкви «Санта Мария Моджоре» на одном из могильных камней имеется надпись, из которой следует, что изобретателем очков (*inventore degli occhiali*) является Сальвино Арматти, умерший в 1317 г. Само же изобретение очков, согласно словарю итальянской академии Делла Круска, произошло в 1285 г. Появившиеся очки сразу нашли своих потребителей, и их производство быстро стало расти. В 1301 г. венецианским Государственным советом был издан приказ, запрещающий изготовление очков из низкосортного стекла. Можно считать, что это был прообраз

современных государственных стандартов, регламентирующих качество изготовления очков.

Первые очковые линзы предназначались для коррекции дальновидности и были длиннофокусными двояковыпуклыми или плоско-выпуклыми. Отрицательные очковые линзы для коррекции близорукости появились примерно через 150 лет после изобретения положительных линз (1430 г.). Затем потребовалось еще почти два столетия для соединения положительной и отрицательной линз в единую систему, легшую в основу современных телескопических оптических приборов, микроскопов и целого ряда других, включая офтальмологические.

Для предотвращения сколов по краям линз их стали оправлять ободками, сначала деревянными, а в дальнейшем и роговыми. Первым шагом на пути создания роговых оправ привычной нам формы стало соединение рукояток от обоих ободков штифтом, что хоть и не очень удобно, но все же позволило как-то закрепить очковые линзы на носу. Идея привязать веревочку за ободки оправы и зацепить ее как-то за уши пришла только в XVI в. К этому времени оправы изготавливали не только из дерева, но и из металла, кожи, рога и китового уса. Появление заушников заставило задуматься о жестком соединении ободков по центру. Так у очков появился мостик (переносье), и тем самым закончился многовековой процесс формирования основных элементов очковой оправы, которая наконец-то полностью освободила руки человека, носящего очки. В истории очковой оптики был даже период, когда ученые не признавали очки и считали их вредным изобретением.

В России очки появились в конце XVI в. Вначале их главными обладателями были представители высшего духовенства и цари, а затем в течение столетия они получили широкое распространение. В 80–90-х гг. XVII в. русские купцы продавали их в Китай и Сибирь.

Первое документальное упоминание об очках в русских архивах относится к 1636 г. Оптические характеристики очковых линз, хранящихся в Государственной оружейной палате в Москве пяти пар «Патриарших» очков XVII в., следующие: фокусное расстояние — от 450 до 240 мм; рефракция — от 2,2 дптр до 4,2 дптр; диаметр линз — от 33 до 45 мм; форма линз — плоско-выпуклая; цвет стекла — от белого до зеленоватого. Небезынтересно отметить, что рефракция левой и правой очковых линз в одних и тех же очках отличаются на величину до 0,2 дптр.

Следующим шагом в истории очковой оптики было изобретение в 1784 г. знаменитым американским ученым Бенджаменом Франклином «двухфокусной» (бифокальной) очковой линзы. Свое изобретение он осуществил, будучи в преклонном 78-летнем возрасте, поняв, что для коррекции возрастной дальнозоркости (пресбиопии) желательно иметь в очковых линзах зоны разной рефракции. Для этого он просто вставил половинки двух линз в оправу. Он же, кстати, через несколько лет изобрел и «двухфокусную» подзорную трубу, т.е. зрительную трубу с переменным увеличением.

Начиная с изобретения Б. Франклина, все крупные достижения в очковой оптике являются «профессиональными», то есть осуществлены учеными, врачами или инженерами, работающими в области оптики, офтальмологии или связанных с ними областях. Так, для коррекции астигматизма глаза, открытого и исследованного в 1801 г. Т. Юнгом, астроном Эри в 1827 г. предложил использовать цилиндрические очковые линзы.

В 1837 г. через 53 года после изобретения Франклина были изготовлены бифокальные линзы путем наклейки добавочной линзы на основную (Уэльс и Гульд). Цельную бифокальную линзу сделали через 68 лет (в 1905 г.) после склеенной, а спеченную — спустя лишь три года (Борш в 1908 г.). Всего через два года вслед за нею появилась и трифокальная спеченная линза (1910 г. Коннор).

Оптические качества очков значительно повысились с заменой в 1909 г. (Чернин, Оствальд, Волластон, фон Рор) так называемой БИ-формы (двояковыпуклые или двояковогнутые) на менисковую конфигурацию линз. Такие линзы, выполненные с расчетом минимального астигматизма наклонных пучков лучей, получили название пунктальных. Они впервые были выпущены фирмой К. Цейсса. В 1932 г. эта же фирма изготовила асферические катральные линзы высоких рефракций для коррекции афакического глаза. В 1960 г. появились линзы с плавноменяющейся рефракцией (прогрессивные) (Франция, ГДР).

Интересно отметить, что историческая хронология в изобретении очковых линз — «положительные, отрицательные, бифокальные, астигматические» коррелирует с частотой различных видов аметропий «гиперметропия, миопия, пресбиопия, астигматизм».

Большое значение на рост производства очков оказало появление дешевых и технологичных материалов для оправ в виде целлулоида (70-е гг. XIX в.), а затем и этрола (вторая половина XX столетия).

Двадцатому веку принадлежат еще два способа коррекции недостатков зрения — применение контактных линз и развитие микрохирургии глаза. Но еще долго самым массовым средством коррекции зрения будут оставаться очки.

В Европе очки известны уже в конце средних веков. Первое изображение человека с очками встречается на картине Томассо да Модена (1352 г.)

## КРАТКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИКИ ПО-ЛАТЫНИ ЭТИМОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ (К РАЗДЕЛУ 4)

### А

**Адаптация** (лат. *adaptation* < *adaptare* — приспособлять, приспособление) — в медицине — адаптация глаза к зрительному раздражению, световая и темновая адаптация)

**Аккомодация** (лат. *accomodatio* — приспособление к чему-л.), в медицине — приспособление глаза к ясному видению, фокусировка на предмет изменением оптической силы глаза

**Аметропия** (а...+ греч. *metron* — мера + *opsis* зрение) — отклонение от нормального зрения (близорукий, дальнозоркий).

**Артифакция** (псевдофакция) — наличие искусственного хрусталика в глазу после проведенной ранее операции с имплантацией искусственного хрусталика (интраокулярной линзы)

**Афакия** (*a* — отрицание, греч. *факос* — линза, чечевица) — вид аметропии при отсутствии хрусталика

### Б

**Белковая** (белочная) оболочка, или склера (от греч. *sclera* — твёрдый) — задний отдел фиброзной оболочки глаза

### Г

**Глаз** — (лат. *oculus*)

**Гиперметропия** (лат. гипер — сверх, + греч. *metron* — мера + *opsis* — зрение) — дальнозоркость, один из видов аметропии, дальняя точка находится за сетчаткой

**Глазное яблоко** — (лат. *bulbus oculi*) — состоит из ядра и трех оболочек: наружной – фиброзной, средней – сосудистой и внутренней – сетчатой

**Гороптер** (*horopter* — от греч. *horos* — граница + *opter* — наблюдатель) — геометрическое место точек внешнего пространства, которые дают изображения на корреспондирующих местах сетчатки, называется гороптером

## Д

**Дивергенция** (от лат. *divergere* — расхождение) — разведение

**Дивергенция глаз** — разведение зрительных осей глаз поворотом глазных яблок при наблюдении удаленных предметов

**Диспаратные точки** — если изображение точки не лежит на корреспондирующих точках сетчаток правого и левого глаза, то говорят, что изображение лежит на диспаратных точках сетчаток

**Дневное зрение** — см. фотопическое зрение

## З

**Зрительный нерв** (лат. *nervus opticus*) — выходит из глазного яблока

## К

**Компаратные точки** (от лат. *comparative*) — сравнительные, соответственные

**Конвергенция** (от лат. *convergere* — схождение, сближение) — анат. сведение зрительных осей глаз при рассматривании близких предметов

**Конъюнктива** (от лат. *conjunctivus* — соединительный) — соединительная оболочка глаза — тонкая прозрачная слизистая оболочка, покрывающая заднюю поверхность век и переднюю поверхность глазного яблока (до роговицы).

## М

**Макула** (лат. *macula*) — пятно сетчатки, или желтое пятно (устар) см. пятно сетчатки

**Мезопическое** (от греч. *mesos* — средний, промежуточный + *ops* — глаз — зрение), промежуточное зрение, в котором участвуют и колбочки, и палочки, в отличие от дневного или сумеречного зрения

**Миопия** (от греч. *myops*) - близорукость, один из видов аметропии, дальняя точка находится перед сетчаткой

## П

**Периферия** (от греч. *periphēreia* — окружность; внешняя часть чего-л. в отличие от центральной его части)

**Пресбиопия** (от греч. *presbys* старый + *ops* (*opos*) взгляд, зрение) — возрастная, или старческая дальнозоркость

**Пятно сетчатки** (устар. *желтое пятно*), макула (лат. *macula* — пятно) — самое чувствительное место сетчатки

## Р

**Радужная оболочка, или радужка** — (от лат. *iris*) — имеет вид диска с отверстием посередине, расположенного позади прозрачной роговицы. Своим наружным краем радужка переходит в ресничное тело, а внутренним, свободным ограничивает отверстие –зрачок (см. рис.35)

**Ресничная мышца** — цилиарная мышца по аналогии с ресничным телом (см. ниже)

**Ресничное тело** — (лат. *corpus ciliare*) — имеет вид валика, вдаётся внутрь глазного яблока, где белочная оболочка переходит в роговицу (см. рис.35)

**Роговица, роговая оболочка** (лат. *cornea*) — передний отдел фиброзной оболочки глазного яблока, занимает 1/5 ее поверхности, прозрачная, сильно изогнутая, бессосудистая



## С

**Сетчатая оболочка, или сетчатка** (лат. *retina*) — прилежит к стекловидному телу, ее задняя часть — зрительная, светочувствительная, так как в ней расположены зрительные рецепторы

**Склера** — см. Белковая оболочка

**Скотопическое** (от греч. *scotos* — темнота + *ops* — глаз) — сумеречное, или ночное зрение, которое обеспечивают зрительные рецепторы палочки

**Собственно сосудистая оболочка – хориоидея** — (лат. *chorio idea*), часть сосудистой оболочки, тонка, богата сосудами, содержит пигментные клетки, придающие ей темно-коричневый цвет

**Стекловидное тело** (от лат. *corpus vitreum*) — входит в состав ядра глазного яблока см.[18], заполняет в глазу все пространство между сетчатой оболочкой сзади и хрусталиком; состоит из прозрачного студенистого межклеточного вещества и не имеет сосудов

**Стереоскопия** (от греч. *στερεός* — телесный, объемный + *σκόπεω* — смотрю, наблюдаю)

**Сумеречное зрение** — см. Скотопическое зрение

## Ф

**Фовеола** — см. Центральная ямка

**Фотопическое** (от греч. *photos* — свет + *ops* — глаз) зрение — дневное зрение, которое обеспечивают зрительные рецепторы – колбочки

## Х

**Хрусталик** (от лат. *lens*) — имеет форму двояковыпуклой линзы, лишен сосудов и нервов, совершенно прозрачен, имеет слоистое строение

## Ц

**Центральная ямка или фовео, фовеола** (лат. *fovea centralis*) — находится в середине макулы

## Э

**Эмметропический** (от гр *emmetros* + *ops* глаз), эмметропический, т.е. (нормальный) глаз с дальней точкой в бесконечности

## КРАТКИЙ ЭТИМОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ, ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ В ОПТИКЕ

### А

**А...ан** — начальная часть слова со значением отрицания

**Аберрации оптической системы** (от лат. *aberratio* — отклонение) — искажения, погрешности изображений, формируемых оптическими системами; отклонение хода реального (действительного) луча от идеального.

**Аксиальный** (лат. *axis*) — ось, осевой

**Альбедо** (от позднелат. *albedo*, от латинского *albus* — белый) — величина, характеризующая отражательную способность поверхности каких-либо объектов. Измеряется отношением количества света, отраженного поверхностью по всем направлениям, к количеству света, падающего на нее.

**Анализ** (гр. *analysis*) — разложение, расчленение

**Анаморфоз** (гр. *anamorphosis* — искажение формы) — изображение какого-либо предмета, полученное с помощью ОС или наклоном плоскостей объекта и экрана; применяется в кинотехнике, обработке аэроснимков.

**Анаморфот** (гр. *anamorphot* — преобразователь) — объектив с двумя плоскостями симметрии.

**Анастигмат** (от греч. *an* - — без, *a* — не, и *stigma* — точка) — в узком смысле слова — оптическая система (объектив), не вносящая астигматизм; в реальном широком смысле слова — объектив, в котором исправлены практически все аберрации. Простейшим анастигматом является триплет

**Апертура** (от лат. *apertus* — открытый и лат. *apertura* — отверстие) — действующее световое отверстие оптического прибора.

**Апланат** (гр. *aplanatos* от греч. *a* — не, и *plane* — блуждание, отклонение, ошибка) — буквально: неотклоняющийся, безошибочный; в узком смысле слова *апланат* — объектив, в котором исправлена сферическая aberrация и выполнено условие синусов, поэтому исправлена кома; в широком смысле слова в апланате также исправлены хроматические aberrации, уменьшен астigmatизм, не устранена кривизна поля. В настоящее время заменен анастигматом

**Аподизация** — словообразование из греческих корней, обозначающее устранение «основания», т.е. устранение побочных колец; — специально создаваемая неравномерность пропускания по зрачку, влияет на передачу структуры изображения сложного объекта.

**Апохромат** (от греч. *apo* — из, от, без, уменьшение и *chromatos* — цвет) В узком смысле слова — объектив, у которого исправлена хроматическая aberrация положения для трех и более длин волн (цветов) (например: для фиолетового, зеленого и красного), уменьшен вторичный спектр. Исправление или уменьшение вторичного спектра достигается использованием для положительных и отрицательных линз стекол с одинаковыми относительными частными дисперсиями, усложнением конструкции ОС. В реальном смысле слова в апохромате также исправлена сферическая aberrация и кома.

**Астигматизм** (гр. *a* — отрицательная частица и *stigma* — точка) — одна из aberrаций ОС точки вне оси для бесконечно узкого наклонного пучка, проявляющаяся в том, что внеосевые точки объекта изображаются ОС двумя взаимно перпендикулярными отрезками, расположенными на некотором расстоянии друг от друга. Вследствие астигматизма изображение получается нечетким.

**Ахромат** (от гр. *achromatos* — бесцветный) — объектив с исправленным хроматизмом положения и увеличения.

## Б

**Бинокль** (фр. *binocle* — гр. *bini* — два + лат. *oculus* — глаз) — оптический прибор, состоящий из двух одинаковых частей, соединенных между собой, и дающий объемное (стереоскопическое) изображение; каждая часть

бинокля представляет собой зрительную трубу, формирующую прямое изображение предметов благодаря применению оборачивающих систем.

**Бленда** (от нем. *Blende* — козырек, экран, укрытие...) — принадлежность, обычно в виде полого усеченного конуса с непрозрачными, рифленными, зачерненными для уменьшения отражений, стенками, служащее для предотвращения попадания в объектив световых лучей, не участвующих в образовании изображения. Раскрытие бленды должно соответствовать углу поля изображения объектива

## В

**Виньетирование** (от франц. *vignette* — заставка) — частичное затемнение широкого наклонного пучка лучей при прохождении через оптическую систему вследствие ограничения различными диафрагмами оптической системы (оправами линз, призмами и др.). Приводит к постепенному падению освещенности изображения при переходе от его центра к краям. Термин применяется и к затемнению части изображения

## Д

**Диаскопическая** (гр. *dia* — через, сквозь + *skopeo* — смотрю) проекция — служит для получения увеличенного изображения прозрачного предмета (напр., на диапозитиве или пленке) на экране, применяется в ОС проекционных приборов.

**Диафрагма** (от греч. *diaphragma* — перегородка) — устройство, непрозрачная преграда, изменяющая размеры действующего отверстия объектива и этим ограничивающее поперечное сечение световых пучков, проходящих через объектив. Обеспечивает ограничение количества света, поле системы; улучшение качества изображения, уменьшая aberrации, также уменьшает количество рассеянного света. Известны диафрагмы апертурные, полевые, виньетирующие и бленды, устраняющие посторонние засветки.

**Диоптрия** (от греч. *dioptr* — видящий насквозь или гр. *dia* — через, сквозь и *optr* между) — единица оптической силы линз, сферических зеркал, и сложных оптических систем. Одна диоптрия соответствует оптической силе линзы или сферического зеркала с фокусным расстоянием 1 м.

янием в 1 метр. Оптическая сила линзы в диоптриях равна обратной величине фокусного расстояния, выраженной в метрах

**Дисперсия света** (от лат. *dispersio* — рассеяние) — в оптике: явление разложения света на составляющие разных цветов из-за неодинаковости скорости распространения в среде лучей, имеющих различные длины волн. Дисперсия оптических сред – зависимость показателя преломления  $n$  оптической среды (оптического материала) от длины волны  $\lambda$  света.

**Дисторсия** (от лат. *distorsio* — искривление) — погрешность изображения ОС – вид аберрации, при которой нарушается геометрическое подобие между объектом и его изображением

**Дифракция** (от лат. *diffractus* — разломанный, преломленный) света: отклонение распространения света от прямолинейного, например, вблизи препятствий, на оправе объектива, либо иная трансформация волны при прохождении через неоднородную среду.

**Дуплет** (от фр. *doublet*) — удвоенный, двойной — в оптике название фотобъектива, состоящего из двух компонентов с конечным расстоянием между ними.

### З

**Зум, зум-объектив** (от англ. *zoom* — менять масштаб изображения)

**Звукоподражание**, изначальное значение которого было «быстро перемещаться вдоль», издавая характерные жужжащие звуки – синоним панкратического объектива с моторным приводом.

### И

**Изотропия** (гр. *isos* — равный, одинаковый и *tropos* — поворот, направление) — независимость свойств среды от направления.

**Иммерсионный** (позднелат. *immersion*) — погружение

## К

**Камера обскура** (от лат. *camera obscura* — букв. темная комната) — простейшее оптическое устройство, приспособление, позволяющее получать на экране изображения предметов; предшественник фотокамеры. Представляет собой темный ящик (первые камеры-обскуры были целыми комнатами) с небольшим отверстием в одной из стенок, перед которым помещают рассматриваемый объект. На противоположной от отверстия стене формируется изображение предмета

**Кандела** (лат. *candela*) — свеча, единица силы света

**Кардинальный** (лат. *cardinal*) — самый существенный, важный, главный

**Катадиоптрика** (гр. *katoptrikos* — зеркальный и *dioptricos* — относящийся к прохождению сквозь прозрачную среду, устар. назв. раздела оптики)

**Катадиоптрические системы** — зеркально-линзовые системы

**Каталог** (гр. *kataloges*) — список

**Катоптрика** (гр. *katoptrikos* — зеркальный) — устар. название раздела геометрической оптики, в котором рассматриваются оптические свойства отражающих поверхностей (оптически зеркал) и зеркальных систем

**Каустика** (гр. *kaustikos*) — жгучий, палящий.

**Кома** (греч. *кома* — пучок волос, хвост), — полевая aberrация ОС, aberrация широкого наклонного пучка лучей, при которой нарушается симметрия этого пучка относительно главного луча

**Коллектив** (лат. *collectivus*) — собирать, собирательный

**Коллиматор** (*collimar* — искажение лат. *collimare* — направлять по прямой линии)

**Концентрическая ОС** (лат. *conc* + *centrum* – центр), система, радиусы кривизны которой имеют один центр кривизны, с которым совпадает осевая точка апертурной диафрагмы.

**Концентрический** (лат. *conc* + *centrum*) — центр, средоточие, имеющий общий центр

**Контраст** (от франц. *contraste* — противоположность, от латинского *contra* — против) — при оценке качества изображения — отношение разности максимальной и минимальной освещенности изображения к их сумме.

**Кратность** (от греч. *kratos* — сила, мощь) — в общем случае: степень увеличения; отношение величин, например, фокусных расстояний. Кратность телескопической системы равна отношению фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра объектива). Кратность объектива с переменным фокусным расстоянием (вариообъектива) равна отношению максимального фокусного к минимальному

## Л

**Линза** (нем. *Linze* от лат. *lens* — чечевица)

**Луна** (фр. *loupe*) — собирающая линза в оправе или система из нескольких линз, увеличивающая размеры мелких рассматриваемых предметов

**Люкс** (от лат. *lux* — свет; дневной, солнечный свет) — единица освещенности в Международной системе единиц (СИ). Сокращенной обозначение: русское — лк, международное — lx. Люкс — освещенность поверхности

**Люмен** (от лат. *lumen* — свет; светоч) — единица светового потока в Международной системе единиц (СИ). Сокращенной обозначение: русское — лм, международное — lm. Люмен — световой поток, испускаемый точечным изотропным источником

## М

**Мениск** (от гр. *meniskos* — лунный серп) — форма линзы



**Метрология** (от греч. *metron* — мера, и *logos* — слово, учение) — наука об измерениях; отрасль физики, занимающаяся установлением единиц измерения, созданием эталонов единиц, и разработкой методик точных измерений.

**Микроскоп** (гр. *micros* — малый и *skopeo* — смотрю) — оптический прибор для получения сильно увеличенных изображений объектов (или деталей их структуры)

**Монохроматический** (гр. *monos* — один, единственный и гр. *chroma* — цвет) — свет; —один цвет, или одна длина волны

**Монокуляр** (гр. *monos* — один и лат. *oculus* — глаз) — оптический прибор, с одним окуляром, дающий прямое изображение и представляющий собой зрительную трубу

## О

**Объектив** (лат. *objectus* — предмет) — обращенная к объекту часть ОС, или самостоятельная оптическая система, формирующая действительное изображение

**Окуляр** (от лат. *oculus* — глаз) — обращенная к глазу наблюдателя часть ОС (зрительной трубы, телескопа, бинокля, микроскопа), служит для визуального рассматривания действительного изображения, которое формирует объектив или друга предшествующая оптическая часть системы

## П

**Панкратический** (от греч. *pan* — все и *kratos* — сила, мощь) — имеющий непрерывную изменяемую степень увеличения

**Параксиальный** (от гр. *para* — возле и *axis* — ось) — приосевой, расположенный вблизи оси)

**Параллакс** (от греч. *parallelos* — рядом идущий и латинского *axis* — ось) — смещение изображения рассматриваемого предмета, вызванное изменением точки наблюдения из-за погрешности наведения на предмет

**Параметр** (гр. *parametron* — отмеривающий)

**Пиксел** (от английского сокращения *pixel: picture element* — элемент изображения); —элемент изображения, точка растра — минимальный адресуемый элемент двумерного, обычно — прямоугольного, растрового изображения для которого задаются или определяются цвет и яркость.

## Р

**Рефракция** (от позднелат. *refraction* — преломление)

## С

**Синтез** (гр. *synthesis* — соединение, сочетание, составление)

**Синглет** (от англ. *single* — одиночный) —объектив из одиночной линзы или одного компонента (из классификации фотообъективов)

**Спектр** (лат. *spectrum* — видимое, видение) — совокупность всех значений какой-либо величины, характеризующей систему или процесс (например, оптические спектры)

## Т

**Телеобъектив** (гр. *tele* — далеко+лат. *objectus* — предмет) — объектив телескопической системы, длиннофокусный объектив фото- или кино-аппаратуры, оптическая длина которых меньше фокусного расстояния

**Телескоп** (гр. *tele* — вдаль, далеко и *skopeo* — смотрю) — астрономический инструмент для наблюдения небесных светил

**Трансфокатор** (лат. *trans* — сквозь, через и *phocus* — фокус) вид объективов с изменяемым (переменным) фокусным расстоянием: представляет собой систему, состоящую из афокальной панкратической насадки с переменным угловым увеличением и объектива с постоянным фокусным расстоянием.

**Триплет** (фр. *triplet* — утраивать, лат. *tripletus*, дословно — тремя наполненный) — тип объектива, содержащий три группы линз, или три

компонента с воздушными промежутками между ними

## Ф

**Фокус** (от лат. *focus* — очаг, огонь) — точка, в которой пересекаются преломленные или отраженные оптической системой параллельные лучи или их мысленные продолжения, если система преобразует параллельный пучок в расходящийся. Задний фокус находится на оси оптической системы, если входящие лучи параллельны оси. Задний фокус — точка, сопряженная с точкой, сопряженной с бесконечностью в пространстве предметов.

**Фотоаппарат** (от греч. *photos* — свет и лат. *apparatus* — приготовление, устройство); фотографический аппарат: оптическая система, предназначенная для получения статичных изображений фотографируемых объектов на светочувствительном слое фотопленки, фотопластинки или другого фотоматериала, а также на светочувствительных элементах различных электронных устройств, например ПЗС-матрице.

## Э

**Эпископ, эпископический** (гр. *epi* — на, над, сверх и *skopeo* — смотрю) — проекционный прибор, предназначенный для получения увеличенных изображения непрозрачных объектов на экране

**Этимология** (гр. *etimologia* < *etimon* — истина, основное значение слова + *logos* — понятие, учение) — раздел языкознания, исследующий происхождение слов разных языков

## Ю

**Юстировка** (лат. *Justus* — правильный, справедливый) — совокупность операций по приведению оптического прибора в рабочее состояние

# Оглавление

Предисловие.....	3
Введение.....	4
Раздел 1	
<b>Классификация и основные оптические характеристики оптических систем</b>	
1.1. Оптическая система (ОС).....	6
1.2. Классификация ОС.....	8
Раздел 2	
<b>Основные оптические характеристики ОС</b>	
2.1. Масштаб изображения .....	12
2.2. Линейное и угловое поле оптической системы .....	16
2.3. Светосила и освещённость ОС .....	19
2.4. Спектральные характеристики ОС .....	26
Раздел 3	
<b>Качество изображения</b>	
3.1. Кружок Эри и его определение .....	28
3.2. Влияние aberrаций и формы апертурной диафрагмы на распределение освещенности в дифракционном изображении точки (на ФРТ) .....	33
3.3. Разрешающая способность и критерии ее оценки.....	35
3.4. Волновые критерии оценки качества изображения .....	38
3.5. Критерий Штреля .....	41
3.6. Классификация ОС по значениям волновых aberrаций .....	42
3.7. Распределение освещённости в изображении точки на оси в случае сферической aberrации и недостатков изготовления и сборки .....	43
3.8. Влияние неравномерности пропускания света по зрачку на распределение освещенности в дифракционном изображении точки (ФРТ). Аподизация дифракционной картины.....	46
3.9. Оптическая передаточная функция (ОПФ) и функция передачи модуляции (ФПМ).....	49
Раздел 4	
<b>Глаз человека как оптическая система и приёмник оптического излучения</b>	
4.1. Строение глаза .....	58
4.2. Основные характеристики глаза $f'_{\text{гл}}$ , $D_{\text{гл}}$ , $2\omega_{\text{гл}}$ .....	66
4.3. Свойства глаза.....	67

4.4. Субъективная яркость изображения .....	75
4.5. Недостатки глаза .....	75
4.6. Коррекция недостатков зрения .....	77
4.7. Стереоскопическое зрение .....	79
4.8. Требования к оптической системе, работающей совместно с глазом. Согласование параметров глаза и оптических систем ....	82
<b>Список литературы</b> .....	83
<b>Приложения</b> .....	84
<b>Из истории очковой оптики</b> .....	90
<b>Краткий словарь терминов физиологической оптики по-латыни и этимологический словарь (к разделу 4)</b> .....	94
<b>Краткий этимологический словарь терминов, встречающихся в оптике</b> ....	99

*Внутривузовское издание*

Подписано в печать 25.09.2017. Гарнитура Таймс

Формат 60×90/16 Бумага офсетная

Объем 7,0 усл. печ. л

Тираж 40 экз. Заказ № 91

Отпечатано в УПП «Репрография» МИИГАиК