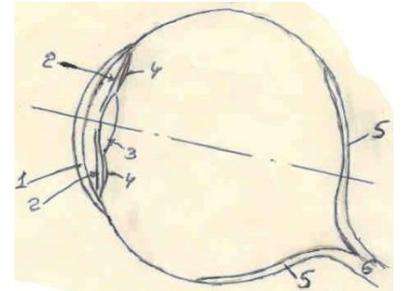


Оптика. Лекция 3

Глаз как оптическая система. Очки

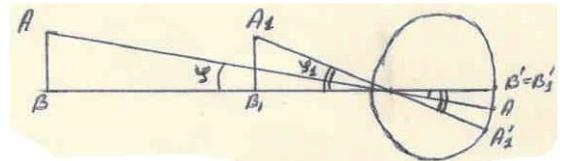
Глаз человека имеет почти шарообразную форму (см. рисунок). Его диаметр около 2,5 см. Снаружи он покрыт защитной оболочкой белого цвета. Её передняя прозрачная часть (1) называется *роговой оболочкой* или *роговицей*. За роговицей на некотором расстоянии расположена радужная оболочка (2), окрашенная особым веществом в какой-либо цвет, с отверстием – зрачком. В зависимости от интенсивности падающего света, диаметр зрачка рефлекторно (за счет растяжения или сокращения мышц радужной оболочки) меняется приблизительно от 2 до 8 мм, защищая глаз от попадания слишком большой световой энергии. За зрачком помещается хрусталик (3) – эластичное прозрачное тело, похожее на двояковыпуклую линзу. Особая мышца (4) может в некоторых пределах менять форму хрусталика, делая его более выпуклым (т.е. увеличивая его оптическую силу) при рассмотрении близких предметов. Полость между роговицей и хрусталиком заполнена *водянистой жидкостью*; за хрусталиком до задней стенки (глазного дна) находится прозрачное полужидкое *стекловидное тело*. Глазное дно покрыто очень сложной сетчатой оболочкой (сетчаткой) (5), представляющей собой разветвления зрительного нерва (6) с нервными окончаниями в виде *палочек* и *колбочек*. Палочки и колбочки являются свето ощущающими элементами. Причем, палочки обеспечивают так называемое сумеречное зрение (они очень чувствительны к свету), с помощью которого различаются размеры и форма предметов, а цветовое зрение осуществляется с помощью колбочек. Наибольшее преломление попадающие в глаз лучи света испытывают на поверхности роговицы. Небольшое дополнительное преломление осуществляет хрусталик.



В целом оптическую систему глаза можно рассматривать как *собирающую линзу с переменным фокусным расстоянием, находящуюся на неизменном расстоянии от экрана*. Экраном, на котором образуется действительное и, значит, обратное изображение предмета, служит сетчатка. Если предмет находится далеко, изображение получается на сетчатке *нормального глаза* без напряжения мышцы хрусталика. При этом фокусное расстояние оптической системы глаза (роговица, водянистая жидкость, хрусталик, стекловидное тело) равно расстоянию l от ее оптического центра до сетчатки глаза. Это следует из формулы линзы: $1/\infty + 1/l = 1/F_1$. Поскольку $l \approx 17$ мм, то при расслабленной мышце хрусталика оптическая система глаза имеет фокусное расстояние $F_1 \approx 17$ мм и оптическую силу $D_1 \approx 59$ дптр. Если предмет приближается, рефлекторное напряжение мышцы делает хрусталик

более выпуклым, и обеспечивает такое уменьшение фокусного расстояния глаза, что плоскость изображения снова совмещается с сетчаткой. *Приспособление глаза к изменению расстояния до наблюдаемого предмета за счет изменения оптической силы глаза называется **аккомодацией глаза***. Точка, которую глаз видит при расслабленной мышце хрусталика, называют **дальней точкой аккомодации**, а видимая при максимально напряженной мышце – **ближней точкой аккомодации**. Для нормального глаза дальняя точка лежит бесконечно далеко, а ближняя – на расстоянии 15-20 см от глаза.

С приближением предмета увеличивается угол зрения (см. рисунок), под которым мы видим две близкие точки предмета. Когда этот угол становится больше **предельного угла разрешения** $\varphi_0 \approx 1'$ (одна минута), изображения двух точек попадают на разные нервные окончания, и мы видим их отдельно. Однако приближать предмет к глазу на очень малое расстояние для рассматривания его мелких деталей не имеет смысла, т.к. аккомодация глаза имеет ближний предел.

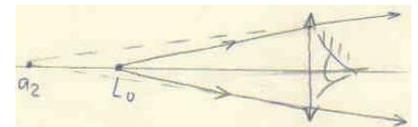


Определение. Расстояние от предмета до глаза, при котором можно без чрезмерного напряжения рассматривать детали предмета, называют **расстоянием наилучшего зрения**.

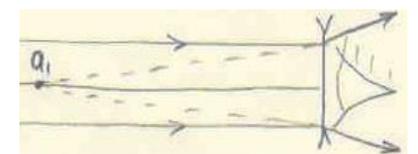
Для нормального глаза расстояние наилучшего зрения считают равным $L_0 = 25$ см.

Увеличение оптической силы глаза, необходимое для разглядывания предмета, находящегося на расстоянии d от глаза, составляет по отношению к ненапряженному глазу $1/d$. Действительно, при взгляде на бесконечность ненапряженным глазом: $1/\infty + 1/l = D_1$. При взгляде на предмет: $1/d + 1/l = D_2$. Откуда $\Delta D = D_2 - D_1 = 1/d$. Поэтому для аккомодации на расстояние наилучшего зрения надо изменить оптическую силу глаза на $\Delta D_0 = 4$ дптр (около 7% от $D_1 = 59$ дптр), а для аккомодации на ближнюю точку – на $\Delta D_{\text{бл}} = 5 - 7$ дптр.

У многих людей точки аккомодации смещены. Если дальняя точка аккомодации лежит на конечном расстоянии a_1 , то говорят о **близорукости**. Коррекция близорукости производится с помощью очков с рассеивающими линзами, помещающими мнимое изображение бесконечно удаленного предмета в дальнюю точку аккомодации глаза, т.е. их фокусное расстояние $F_{\text{бл}} = -a_1$.



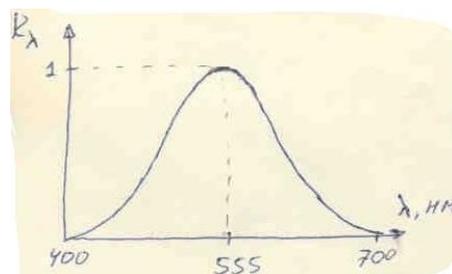
Другой возможный дефект связан со смещением ближней точки аккомодации на слишком большое расстояние и называется **дальнозоркостью**. Дальнозоркость исправляют очками с собирающими линзами. Часто их подбирают так, чтобы они помещали мнимое изображение предмета, находящегося на расстоянии наилучшего зрения, в ближнюю точку аккомодации глаза.



Элементы фотометрии.

Фотометрией называют раздел оптики, изучающий методы измерения энергии, переносимой электромагнитными волнами оптического диапазона ($\lambda \sim 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-3}$ м).

В более узком смысле, рассматриваемом ниже, под фотометрией понимают раздел оптики, посвященный измерению действия видимого света на глаз человека. Для характеристики этого действия вводятся специальные величины: световой поток, сила света, освещенность и др. Но свет – частный случай электромагнитных волн. Почему же недостаточно обычных физических энергетических характеристик света, например, его интенсивности? Это связано с тем, что **глаз человека обладает различной чувствительностью к световым волнам разной частоты**: световые волны разной частоты, имеющие одинаковую интенсивность, вызывают разные световые ощущения. Наибольшую чувствительность глаз имеет к желтому свету с длиной волны в вакууме $\lambda_0 = 5550$ А (555 нм). Чувствительность глаза к свету других длин волн характеризуют *относительной видностью* K_λ . Она равна отношению чувствительности глаза к свету с длиной волны λ к чувствительности глаза к свету с длиной волны λ_0 . Зависимость K_λ от λ (кривая видности) приведена на рисунке. Кривая видности резко спадает к краям: при длинах волн 400 нм и 700 нм чувствительность глаза примерно в 2500 раз меньше, чем при λ_0 . Поэтому *практически*

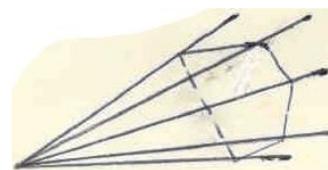


важно знать не просто количество световой энергии, регистрируемое соответствующими измерительными приборами, а интенсивность света, оцениваемую непосредственно нашим глазом. Для этих целей введена особая физическая величина – *световой поток* Φ .

Определение. *Световым потоком* Φ называют протекающую через некоторую поверхность в единицу времени световую энергию, оцениваемую по зрительному ощущению.

Световой поток создается источником света и воздействует на окружающие предметы. Соответственно вводится еще две энергетические величины: одна для характеристики источника света – *сила света источника*, другая для характеристики действия света на поверхности тел – *освещенность поверхности*.

Для описания распределения светового потока, испускаемого источником света в разных направлениях, используют понятие телесного угла. Рассмотрим площадку произвольной формы и мысленно проведем из некоторой точки лучи через все точки кривой, ограничивающей эту площадку. Эти лучи выделяют в пространстве область в форме бесконечного конуса. Такая область пространства называется **телесным углом** Ω . Вообразим сферу радиуса R с центром в вершине телесного угла. Телесный угол Ω «вырезает» на поверхности сферы сфе-



рический сегмент площадью S . Под величиной телесного угла Ω понимают отношение этой площади к квадрату радиуса сферы:

$$\Omega = S/R^2.$$

Очевидно, что величина телесного угла не зависит от радиуса сферы, т.к. вырезаемая им площадь S пропорциональна квадрату радиуса.

Единица телесного угла называется **стерадианом** (ср). Полный телесный угол, охватывающий все пространство вокруг точки, равен $\Omega = S/R^2 = 4\pi R^2/R^2 = 4\pi$ ср.

Определение. Силой света $I(\varphi, \theta)$ источника вдоль данного луча (точки которого имеют сферические угловые координаты φ и θ) называют отношение светового потока $d\Phi$, созданного источником в малом телесном угле $d\Omega$, содержащем данный луч, к величине телесного угла: $I = d\Phi/d\Omega$.

Понятие силы света упрощается для изотропного точечного источника света. Источник света называется **точечным**, если его размеры много меньше расстояний, на которых оценивается его действие. Если источник посылает свет равномерно по всем направлениям, то он называется изотропным. С волновой точки зрения можно сказать, что изотропным точечным источником света называется источник, излучающий сферические волны. Примером хороших изотропных точечных источников света являются звезды.

Очевидно, что сила света изотропного точечного источника $I = \Phi_{\text{полн}}/4\pi$, где $\Phi_{\text{полн}}$ – полный световой поток источника, т.е. оцениваемая по зрительному ощущению мощность светового излучения, распространяющегося по всем направлениям от источника.

В Международной системе единиц СИ за основную единицу фотометрических величин принята единица силы света **кандела** (кд) (до 1970 г её называли *свечой*, св). Дело в том, что проще всего создать эталон именно для силы света. Определение единицы силы света периодически меняется. Например, в 1979 г было дано следующее её определение.

Определение. *Кандела* равна силе света источника, испускающего излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц (длина волны в вакууме – 555 нм), энергетическая сила света которого в рассматриваемом направлении равна $1/683$ Вт/ср.

Все остальные световые единицы, в том числе и единица светового потока, являются производными. За единицу светового потока принимается **люмен** (лм) – *световой поток, испускаемый точечным источником силой света 1 кд в телесный угол, равный 1 ср*. Из приведенных определений следует, что для излучения, соответствующего максимуму видности ($\lambda = 555$ нм) и имеющего мощность 1 Вт, световой поток равен 683 лм.

Источник света почти всегда освещает поверхности предметов неравномерно. Так, лампа, висящая над столом, лучше всего освещает центр стола. Края стола освещены значительно хуже. И дело не только в том, что сила света лампы различна в различных направ-

лениях. Даже в случае изотропного точечного источника на площадку в центре стола придётся большая световая мощность (световой поток), чем на такую же площадку на краю.

Определение. Освещенностью E называется отношение светового потока $\Delta\Phi$, падающего на некоторый участок поверхности, к площади ΔS этого участка: $E = \Delta\Phi/\Delta S$.

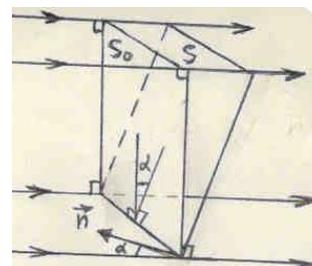
Единица освещенности – люкс (лк), определяется как освещенность, при которой на одном квадратном метре поверхности равномерно распределен световой поток в 1 лм.

Выясним, как зависит освещенность поверхности от ее расположения относительно источника света. Пусть точечный источник с силой света $I(\varphi, \theta)$ находится в центре сферы радиуса R . Рассмотрим малый телесный угол $d\Omega$, содержащий луч, точки которого имеют сферические угловые координаты φ и θ . По определению силы света световой поток испускаемый источником в этот телесный угол $d\Phi = d\Omega I(\varphi, \theta)$, а вырезаемая им площадь поверхности сферы $dS = d\Omega R^2$. Поэтому для освещенности поверхности сферы получим:

$$E(\varphi, \theta) = d\Phi/dS = d\Omega I(\varphi, \theta)/(d\Omega R^2) = I(\varphi, \theta)/R^2.$$

Таким образом, при прочих равных условиях **освещенность поверхности, создаваемая точечным источником света, прямо пропорциональна силе света источника в направлении поверхности и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до поверхности.**

В рассмотренном случае лучи падали на поверхность сферы перпендикулярно (под углом падения, равным нулю). Выясним теперь, как изменится освещенность какой-либо площадки, если при том же расстоянии от площадки до источника угол падения лучей будет отличаться от нуля. Для этого рассмотрим очень маленький участок на внутренней поверхности все той же сферы. Если размеры этого участка значительно меньше радиуса сферы, то его можно считать плоским, а лучи, падающие на него, приблизительно параллельными. Пусть площадь участка равна ΔS_0 (см. рисунок). Рассмотрим другую площадку, на которую от источника падает тот же световой поток, что и на первую. Если вторая площадка составляет с первой угол α , то угол падения на неё лучей, перпендикулярных первой площадке, также будет равен α . Пусть площадь второй площадки равна ΔS . Тогда, очевидно, что $\Delta S_0 = \Delta S \cos \alpha$. Поэтому при одном и том же световом потоке $\Delta\Phi$ освещенности площадок будут разными: $E = \Delta\Phi/\Delta S$, $E_0 = \Delta\Phi/\Delta S_0$. Откуда $E/E_0 = \Delta S/\Delta S_0 = \cos \alpha$. Таким образом, при прочих равных условиях **освещенность поверхности прямо пропорциональна косинусу угла падения лучей.**



Объединив полученные результаты, можно сформулировать **закон освещенности**: освещенность поверхности E , создаваемая точечным источником, прямо пропорциональна силе света I источника в направлении поверхности, косинусу угла падения α лучей на

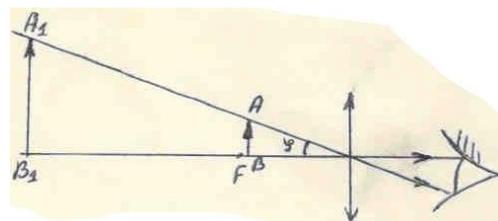
поверхность и обратно пропорциональна квадрату расстояния R от источника до поверхности:

$$E = I \cos \alpha / R^2.$$

Если поверхность освещает несколько **независимых** источников, то общая её освещенность равна сумме освещенностей, созданных каждым источником в отдельности.

Лупа

Как уже говорилось, чтобы мелкие детали рассматриваемого предмета были различимы, угол зрения, под которым они видны, должен быть больше предельного угла разрешения глаза. Возможность увеличения угла зрения за счёт приближения предмета к глазу ограничена ближним пределом его аккомодации. *Увеличение угла зрения при ненапряженном глазе, а так же увеличение угловых размеров удаленных предметов, достигается с помощью оптических приборов. Отношение угла зрения при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения при наблюдении невооруженным глазом называют угловым увеличением прибора.*



Если нормальный глаз рассматривает небольшой предмет AB высотой h , расположенный на расстоянии наилучшего зрения $L = 25$ см, то он видит его под углом $\varphi_0 \approx h/L$. Здесь и далее нас интересуют видные под малыми углами мелкие предметы или детали предметов, и мы пользуемся тем, что тангенсы и синусы малых углов примерно равны самим углам, выраженным в радианах. Если же перед глазом поместить короткофокусную собирающую линзу ($F < L$), а предмет расположить вблизи её фокальной плоскости, то угол зрения φ увеличится и станет равным $\varphi = h/F$. При этом мнимое изображение A_1B_1 предмета AB получается на бесконечности, и, следовательно, глаз разглядывает его без напряжения. *Такая собирающая линза или система линз с малым фокусным расстоянием называется лупой.* Очевидно, угловое увеличение лупы при рассматривании изображения на бесконечности равно

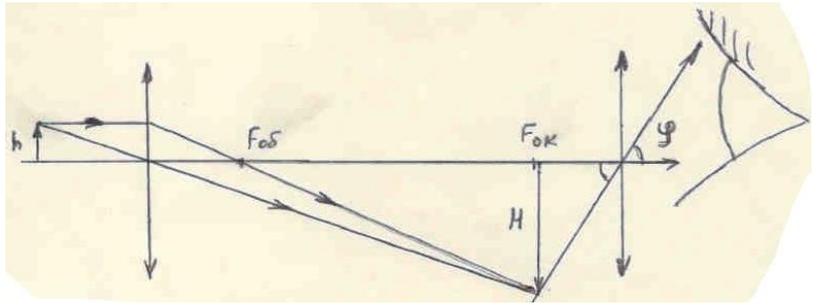
$$\gamma = \varphi / \varphi_0 = L / F.$$

Помещая предмет до фокальной плоскости и получая его изображение на расстоянии наилучшего зрения, можно получить немного большее увеличение, равное $\gamma_1 = 1 + L/F$. Но это уже требует некоторого напряжения глаза.

Видно, что чем меньше фокусное расстояние лупы, тем большее увеличение она дает. На практике лупы с фокусным расстоянием меньше 2 см не применяют. Такие короткофокусные линзы вносят столь серьезные искажения в изображения, что теряется смысл в увеличении. Поэтому обычно угловое увеличение луп лежит в пределах от 5 до 10.

Микроскоп

Для получения большего увеличения используют оптические микроскопы, состоящие из двух короткофокусных систем – объектива и окуляра. Объектив дает увеличенное действительное изображение объекта, которое затем рассматривается в окуляре как в лупу. С этой целью



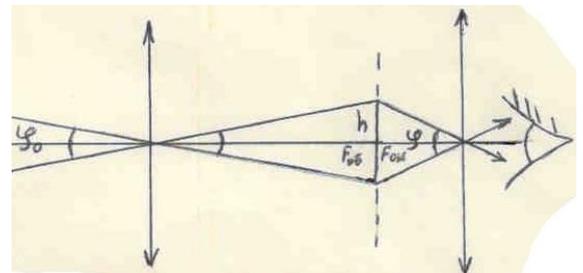
даваемое объективом изображение размером H , за счет перемещения предмета или объектива помещается в фокальной плоскости окуляра (см. рисунок). При этом угол зрения, очевидно, равен $\varphi = H/F_{ок}$, причём $H = h\Delta/F_{об}$. Здесь h – размер предмета, $\Delta = l - F_{ок} - F_{об}$ – расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра, а l – расстояние между объективом и окуляром (длина тубуса микроскопа). Поэтому угловое увеличение микроскопа при рассматривании изображения на бесконечности равно

$$\gamma = \varphi/\varphi_0 = (H/F_{ок}) : (h/L) = hL\Delta/(hF_{ок}F_{об}) = L\Delta/(F_{ок}F_{об}).$$

Здесь $\varphi_0 = h/L$ – угол зрения при рассматривании того же предмета на расстоянии наилучшего зрения L . Подбирая значения фокусных расстояний $F_{ок}$, $F_{об}$ и длину тубуса l , вполне реально получить значение углового увеличения до 1000. Оказывается, что оно не может иметь существенно большие значения из-за волновых свойств света.

Телескоп

Для наблюдения удаленных объектов (планет, звезд) используют телескопы, которые бывают двух основных видов – рефлекторы и рефракторы. Действие *рефлектора* – отражающего телескопа – основано на использовании зеркального, отражающего объектива. Поскольку изготовить хорошо отшлифованное зеркало гораздо проще, чем линзу большого диаметра, то современные телескопы с диаметром в несколько метров – всегда рефлекторы. В *рефракторе* – линзовом телескопе – используют две системы линз.



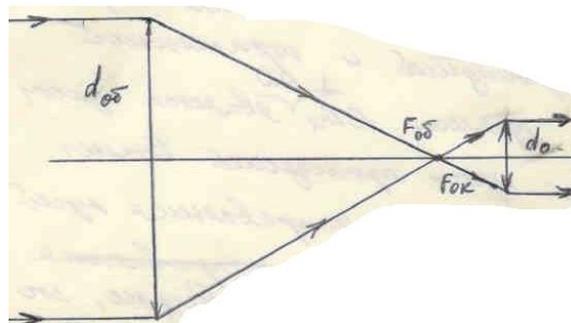
Оптическую систему телескопа для получения максимального углового увеличения конструируют так, чтобы (в отличие от микроскопа!) задний фокус объектива совпадал с передним фокусом окуляра. Это связано с тем, что телескоп предназначен для наблюдения объектов, находящихся от него на очень большом расстоянии (по сравнению с фокусным расстоянием объектива). Изображение таких объектов в объективе получается практически в его фокальной плоскости. Окуляр

же, по-прежнему, выполняет функцию линзы. Угловое увеличение телескопа, очевидно, равно (φ_0 – угловой размер того же объекта, рассматриваемого невооруженным глазом):

$$\gamma = \varphi/\varphi_0 = (h/F_{ок}) : (h/F_{об}) = F_{об}/F_{ок}.$$

Поэтому для получения большого углового увеличения надо использовать длиннофокусный объектив и короткофокусный окуляр. Современные большие телескопы дают угловое увеличение в 500 и большее число раз.

Чтобы прошедший через объектив световой поток полностью проходил через окуляр и создавал максимально возможную освещенность изображения, необходимо, чтобы диаметр окуляра $d_{ок}$ телескопа был больше диаметра падающего на него светового пучка d_0 :



где $d_{ок} \geq d_0 = d_{об}F_{ок}/F_{об} = d_{об}/\gamma$, где $d_{об}$ – диаметр объектива. Аналогично при наблюдении глазом или фотографировании: $d_0 \leq d_{гл}$, где $d_{гл}$ – диаметр зрачка глаза или объектива фотоаппарата. Допустим, что оба эти условия отсутствия потерь прошедшего через объектив светового потока выполнены, т.е.

$$d_{об}/\gamma = d_0 \leq d_{гл} \tag{1}$$

Сравним освещенности изображений, получаемых с телескопом и без него. С одной стороны, использование телескопа приводит к увеличению светового потока, идущего на получение изображения, в $(d_{об}/d_{гл})^2$ раз. С другой стороны, телескоп дает угловое увеличение γ , и, следовательно, увеличение площади конечного изображения в γ^2 раз. Поэтому

$$E_{тел}/E_{без тел} = (\Phi_{тел} : S_{тел})/(\Phi_{без тел} : S_{без тел}) = (d_{об}/d_{гл})^2 (1/\gamma^2) \leq 1, \tag{2}$$

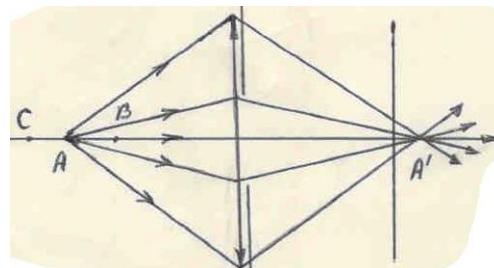
где неравенство следует из условия (1). То есть использование телескопа не увеличивает освещенность изображения! Почему же через телескоп удастся увидеть звезды, которые не видны невооруженным глазом. Дело в том, что угловые размеры звезд настолько малы, что размеры их изображений не меняются при использовании телескопов (это обусловлено в основном дифракционными эффектами, а также разрешающей способностью глаза или фотоаппарата). А световой поток, попадающий от звезд в глаз или фотоаппарат, при использовании телескопа возрастает. Соответственно, и звезды кажутся ярче, особенно на фоне остального неба, освещенность которого в соответствии с (2) не возрастает.

Фотоаппарат. Проекционный аппарат

Основными частями фотоаппарата являются непрозрачная камера и система линз, называемая объективом. Объектив из одной линзы почти не применяется, т.к. он дает большие искажения изображения, особенно по краям. Объектив создает вблизи задней стенки камеры действительное перевернутое изображение фотографируемого предмета. Обычно

это изображение уменьшенное. В том месте, где получается изображение, помещают фотопленку, покрытую слоем светочувствительного вещества, так называемой фотоэмульсией, или полупроводниковую светоматрицу. Фотографируемый объект может находиться на разных расстояниях от аппарата, поэтому в фотоаппаратах предусмотрена возможность изменения расстояния между объективом и пленкой.

Попадающая на фотоэмульсию световая энергия дозируется фотографическим затвором, который открывает доступ свету лишь на определенное время – **время экспозиции**. Оно зависит от чувствительности



фотоэмульсии и от освещенности пленки. Освещенность плёнки тем больше, чем больше размеры линз объектива. Диаметр действующей части объектива можно менять с помощью **диафрагмы**. Этим регулируется освещенность пленки, но не только! Пусть объектив фотоаппарата дает изображение точки A в точке A' . Тогда если поместить пленку в некотором удалении от точки A' , фотографируя, например, точку C (или B), то на ней получится изображение точки A в виде небольшого кружка, диаметр которого будет тем меньше, чем меньше диаметр действующей части объектива. То есть уменьшая отверстие диафрагмы, можно добиться того, что изображения точек, находящихся на разных расстояниях от фотоаппарата, будут достаточно четкими. Возрастёт, как говорят, **глубина резкости** (т.е. расстояние между точками на оптической оси фотоаппарата, изображения которых получаются достаточно четкими). Глубина резкости зависит также от фокусного расстояния объектива: чем оно меньше, тем глубина резкости больше. Дело в том, что для короткофокусного объектива положение изображения менее чувствительно к изменению положения предмета: $f = Fd/(d - F) \approx (d \gg F) \approx F(1 + F/d) = F + F^2/d$.

Проекционный аппарат предназначен для получения на экране действительного **увеличенного** изображения предмета. Таким предметом может быть освещенный сзади рисунок или фотоснимок, выполненный на прозрачной основе – **диапозитив**. Изображение диапозитива создается на экране с помощью системы линз, называемых объективом проекционного аппарата. Если проектор увеличивает изображение кадра в n раз, то освещенность изображения на экране уменьшается в n^2 раз. Поэтому диапозитив надо очень сильно освещать. Для этого в проекторе имеется лампа большой силы света, а также **конденсор** – система линз, которая концентрирует световой поток на проецируемом кадре.