

Лекция №8. Элементы геометрической и волновой оптики. Биофизика зрения

8.1. Структура глаза человека и животного

Глаз человека и животного - замечательное достижение эволюции и отличный оптический инструмент. Порог чувствительности глаза близок к теоретическому пределу, обусловленному квантовыми свойствами света, в частности дифракцией света. Диапазон воспринимаемых глазом интенсивностей составляет , фокус может быстро перемещаться от очень короткого расстояния до бесконечности. Глаз является системой линз, которая формирует перевернутое действительное изображение на светочувствительной поверхности. Глазное яблоко имеет приблизительно сферическую форму с диаметром около 2,3см. Внешняя его оболочка является почти волокнистым непрозрачным слоем, называемым склерой. Свет поступает в глаз через роговицу, представляющую собой прозрачную оболочку на внешней стороне поверхности глазного яблока. В центре роговицы расположено цветное кольцо – радужкой (радужная оболочка) со зрачком посередине. Они действуют подобно диафрагме, осуществляя регуляцию поступления света в глаз. Хрусталик представляет собой линзу, состоящую из волокнистого прозрачного материала. Его форма и, следовательно, фокусное расстояние могут изменяться с помощью цилиарных мышц глазного яблока. Пространство между роговицей и линзой заполнено водянистой жидкостью и называется передней камерой. За линзой расположено прозрачное желеобразное вещество, называемое стекловидным телом. Внутренняя поверхность глазного яблока покрыта сетчаткой, которая содержит многочисленные нервные клетки - зрительные рецепторы: палочки и колбочки, которые отвечают на зрительные раздражения, генерируя биопотенциалы. Наиболее чувствительной областью сетчатки является желтое пятно, где содержится наибольшее число зрительных рецепторов. Центральная часть сетчатки содержит только плотно упакованные колбочки. Глаз вращается, чтобы рассмотреть изучаемый объект.

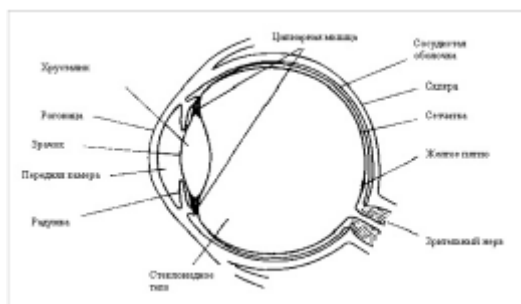


Рис.1. Глаз человека

8.2. Преломление в глазе

Глаз является оптическим эквивалентом обычной фотографической камеры. В нем есть система линз, апертурная система (зрачок) и сетчатка, на которой фиксируется изображение. Система линз глаза сформирована из четырех преломляющих сред: роговицы, водяной камеры, хрусталика, стеклянного тела. Показатели их преломления не имеют значительных отличий. Они составляют 1,38 для роговицы, 1,33 для водяной камеры, 1,40 для хрусталика и 1,34 для стекловидного тела (рис. 2).

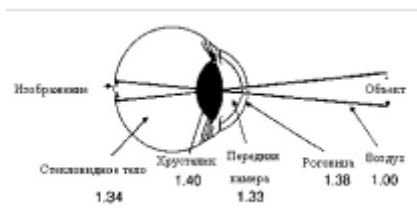


Рис. 2. Глаз как система преломляющих сред (числа являются показателями преломления)

В этих четырех преломляющих поверхностях происходит преломление света: 1) между воздухом и передней поверхностью роговицы; 2) между задней поверхностью роговицы и водяной камерой; 3) между водяной камерой и передней поверхностью хрусталика; 4) между задней поверхностью хрусталика и стекловидным телом. Наиболее сильное преломление происходит на передней поверхности роговицы. Роговица имеет небольшой радиус кривизны, и показатель преломления роговицы в наибольшей степени отличается от показателя преломления воздуха. Преломляющая способность хрусталика меньше, чем у роговицы. Она составляет около одной трети общей преломляющей мощности систем линз глаза. Причина этого различия в том, что жидкости, окружающие хрусталик, имеют показатели преломления, которые существенно не отличаются от показателя преломления хрусталика. Если хрусталик удалить из глаза, окруженный воздухом он имеет показатель преломления почти в шесть раз больший, чем в глазу. Хрусталик выполняет очень важную функцию. Его кривизна может изменяться, что обеспечивает тонкое фокусирование на объекты, расположенные на различных расстояниях от глаза.

8.3. Редуцированный глаз

Редуцированный глаз является упрощенной моделью реального глаза. Он схематически представляет оптическую систему нормального глаза человека. Редуцированный глаз представлен единственной линзой (одной преломляющей средой). В редуцированном глазу все преломляющие поверхности реального глаза суммируются алгебраически, формируя единственную преломляющую поверхность. Редуцированный глаз позволяет провести простые вычисления. Общая преломляющая способность сред составляет почти 59 диоптрий, когда линза аккомодирована на зрение отдаленных объектов. Центральная точка редуцированного глаза лежит впереди сетчатки на 17 миллиметров. Луч из любой точки объекта приходит в редуцированный глаз и проходит через центральную точку без преломления. Так же, как стеклянная линза формирует изображение на листе бумаги, система линз глаза образует изображение на сетчатке. Это уменьшенное, действительное, перевернутое изображение объекта. Головной мозг формирует восприятие объекта в прямом положении и в реальном размере.

8.4. Аккомодация

Для ясного видения объекта необходимо, чтобы после преломления лучей, изображение формировалось на сетчатке. Изменение преломляющей силы глаза для фокусировки близких и отдаленных объектов называется аккомодацией. Наиболее отдаленная точка, на которую фокусируется глаз, называется дальней точкой видения - бесконечность. В этом случае параллельные лучи, входящие в глаз, фокусируются на сетчатку. Объект виден в деталях, когда он установлен как можно ближе к глазу. Минимальное расстояние четкого видения – около 7 см при нормальном зрении. В этом случае аппарат аккомодации находится в максимально напряжённом состоянии.

Точка, расположенная на расстоянии 25 см, называется точкой наилучшего видения, поскольку в данном случае различимы все детали рассматриваемого объекта без максимального напряжения аппарата аккомодации, вследствие чего глаз может длительное время не утомляться. Если глаз сфокусирован на объект в ближней точке, он должен отрегулировать свое фокусное расстояние и увеличить преломляющую силу. Этот процесс происходит путем изменений формы хрусталика. Когда объект подносят ближе к глазу, форма хрусталика изменяется от формы умеренно выпуклой линзы в форму выпуклой линзы. Хрусталик образован волокнистым желеобразным веществом. Он окружен прочной гибкой капсулой и имеет специальные связки, идущие от края линзы к внешней поверхности глазного яблока. Эти связки постоянно напряжены. Форма хрусталика изменяется цилиарной мышцей. Сокращение этой мышцы уменьшает натяжение капсулы хрусталика, он становится более выпуклым и из-за естественной эластичности капсулы принимает сферическую форму. И наоборот, когда цилиарная мышца полностью расслаблена, преломляющая сила линзы наиболее слабая. С другой стороны, когда цилиарная мышца находится в максимально сокращенном состоянии, преломляющая сила линзы становится наибольшей. Этот процесс управляется центральной нервной системой.

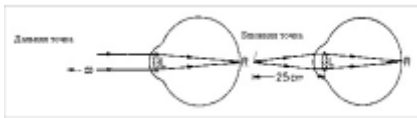


Рис. 3. Аккомодация в нормальном глазе

8.5. Старческая дальнозоркость

Преломляющая сила хрусталика может увеличиваться от 20 диоптрий до 34 диоптрий у детей. Средняя аккомодация составляет 14 диоптрий. В результате общая преломляющая сила глаза составляет почти 59 диоптрий, когда глаз аккомодирован для дальнего зрения, и 73 диоптрия - при максимальной аккомодации. При старении человека хрусталик становится более толстым и менее эластичным. Следовательно, способность линзы изменять свою форму уменьшается с возрастом. Сила аккомодации уменьшается от 14 диоптрий у ребенка до менее 2 диоптрий в возрасте от 45 до 50 лет и становится равной 0 в возрасте 70 лет. Поэтому линза почти не аккомодируется. Это нарушение аккомодации называется старческой дальнозоркостью. Глаза при этом сфокусированы всегда на постоянном расстоянии. Они не могут аккомодироваться как для ближнего, так и дальнего зрения. Следовательно, чтобы видеть ясно на различных расстояниях, старый человек должен носить бифокальные очки с верхним сегментом, сфокусированным для дальнего видения, и более низким сегментом, сфокусированным для ближнего видения.

8.6. Ошибки преломления

Эмметропия. Считается, что глаз будет нормальным (эмметропичным), если параллельные световые лучи с отдаленных объектов фокусируются в сетчатку при полном расслаблении цилиарной мышцы. Такой глаз видит ясно отдаленные объекты, когда расслаблена цилиарная мышца, то есть без аккомодации. При фокусировании объектов ближнего диапазона расстояний в глазе сокращается цилиарная мышца, обеспечивая подходящую степень аккомодации.

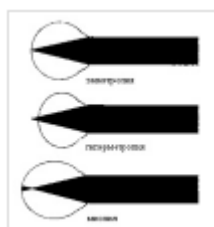


Рис. 4. Преломление параллельных световых лучей в глазе человека

Гиперметропия (гиперопия). Гиперметропия также известна как дальнозоркость. Она обусловлена либо малым размером глазного яблока, либо слабой преломляющей силой системы линз глаза. В таких условиях параллельные световые лучи не преломляются системой линз глаза достаточно для того, чтобы фокус (соответственно изображение) находился на сетчатке. Для преодоления этой аномалии цилиарная мышца должна сократиться, увеличив оптическую силу глаза. Следовательно, дальнозоркий человек способен фокусировать отдаленные объекты на сетчатке, используя механизм аккомодации. Для видения более близких объектов мощности аккомодации не хватает. При небольшом резерве аккомодации дальнозоркий человек часто не способен аккомодировать глаз достаточно для фокусирования не только близких, но даже отдаленных объектов. Для коррекции дальнозоркости необходимо увеличить преломляющую силу глаза. Для этого используют выпуклые линзы, которые добавляют преломляющую силу к силе оптической системе глаза.

Миопия. При миопии (или близорукости) параллельные световые лучи с отдаленных объектов фокусируются перед сетчаткой, несмотря на то, что цилиарная мышца полностью расслаблена. Это бывает из-за слишком длинного глазного яблока, а также вследствие слишком высокой преломляющей силы оптической системы глаза. ет механизма, с помощью которого глаз мог бы уменьшить преломляющую силу своего хрусталика менее, чем возможно при полном расслаблении цилиарной мышцы. Процесс аккомодации приводит к ухудшению видения. Следовательно, человек с миопией не может фокусировать отдаленные объекты на сетчатку. Изображение может сфокусироваться только, если объект находится достаточно близко от глаза. Следовательно, у человека с миопией ограничена дальняя точка ясного видения. Известно, что лучи, проходящие через вогнутую линзу, преломляются. Если преломляющая сила глаза слишком велика, как при миопии, иногда она может быть нейтрализована вогнутой линзой. Используя лазерную технику, можно также откорректировать слишком большую выпуклость роговицы.

Астигматизм. В астигматическом глазе преломляющая поверхность роговицы является не сферической, а эллипсоидальной. Это происходит из-за слишком большой кривизны роговицы в одной из своих плоскостей. В результате световые лучи, проходящие через роговицу в одной плоскости, не преломляются так же сильно, как лучи, проходящие через нее в другой плоскости. Они не собираются в общем фокусе. Астигматизм не может компенсироваться глазом с помощью аккомодации, но корректировать его можно с помощью цилиндрической линзы, которая исправит ошибку в одной из плоскостей.

8.7. Коррекция оптических аномалий контактными линзами

Недавно для коррекции различных аномалий зрения стали использовать пластические контактные линзы. Они устанавливаются против передней поверхности роговицы и фиксируются тонким слоем слез, который заполняет пространство между контактной линзой и роговицей. Жесткие контактные линзы делают из жесткой пластмассы. Их

размеры составляют 1 мм в толщину и 1 см в диаметре. Также существуют мягкие контактные линзы. Контактные линзы заменяют роговицу как внешнюю сторону глаза и почти полностью аннулируют долю преломляющей способности глаза, которая происходит в норме на передней поверхности роговицы. При использовании контактных линз передняя поверхность роговицы не играет значимой роли в преломлении глаза. Основную роль начинает выполнять передняя поверхность контактной линзы. Особенно важно это у лиц с ненормально сформированной роговицей. Другой особенностью контактных линз является то, что, поворачиваясь вместе с глазом, они дают более широкую область ясного видения, чем это делают обычные очки. Они являются также более удобными в использовании для художников, спортсменов и т.п.

8.8. Острога зрения

Способность человеческого глаза ясно видеть мелкие детали ограничена. Нормальный глаз может различать различные точечные источники света, расположенные на расстоянии 25 секунд дуги. То есть, когда световые лучи с двух отдельных точек попадают в глаз под углом более 25 секунд между ними, они видны в качестве двух точек. Лучи с меньшим угловым разделением не могут быть различены. Это означает, что человек с нормальной остротой зрения может различить две точки света на расстоянии 10 метров, если они друг от друга находятся на расстоянии 2 миллиметра. Наличие этого предела предусмотрено структурой сетчатки. Средний диаметр рецепторов в сетчатке составляет почти 1,5 микрометров. Человек может нормально различить две отдельные точки, если в сетчатке расстояние между ними составляет 2 микрометра. Таким образом, чтобы различить два небольших объекта, они должны возбудить две разных колбочки. По крайней мере, между ними один будет находиться 1 невозбужденная колбочка.

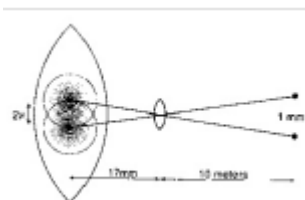


Рис. 7. Максимальная острота зрения для двух точечных источников света.