

Глаз человека

Темы кодификатора ЕГЭ: глаз как оптическая система.

Глаз — удивительно сложная и совершенная оптическая система, созданная природой. Сейчас мы в общих чертах узнаем, как функционирует человеческий глаз. Впоследствии это позволит нам лучше понять принципы работы оптических приборов; да, кроме того, это интересно и важно само по себе.

Строение глаза

Мы ограничимся рассмотрением лишь самых основных элементов глаза. Они показаны¹ на рис. 1 (правый глаз, вид сверху).

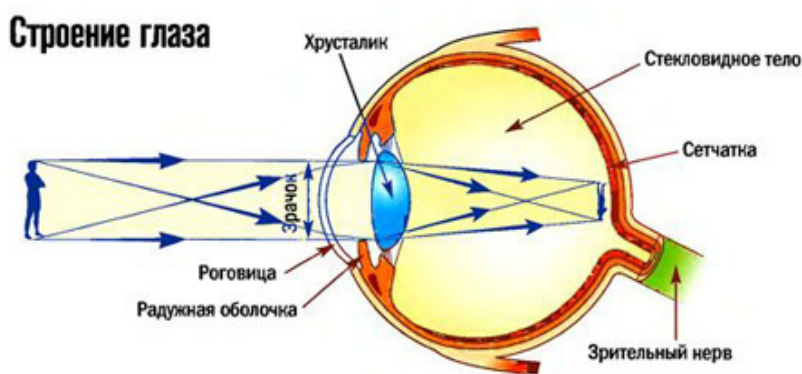


Рис. 1. Строение глаза

Лучи, идущие от предмета (в данном случае предметом является фигура человека), попадают на *роговицу* — переднюю прозрачную часть защитной оболочки глаза. Преломляясь в роговице и проходя сквозь *зрачок* (отверстие в *радужной оболочке* глаза), лучи испытывают вторичное преломление в *хрусталике*. Хрусталик является собирающей линзой с переменным фокусным расстоянием; он может менять свою кривизну (и тем самым фокусное расстояние) под действием специальной глазной мышцы.

Преломляющая система роговицы и хрусталика формирует на *сетчатке* изображение предмета. Сетчатка состоит из светочувствительных палочек и колбочек — нервных окончаний *зрительного нерва*. Падающий свет вызывает раздражение этих нервных окончаний, и зрительный нерв передаёт соответствующие сигналы в мозг. Так в нашем сознании формируются образы предметов — мы *видим* окружающий мир.

Ещё раз взгляните на рис. 1 и обратите внимание, что изображение разглядываемого предмета на сетчатке — действительное, перевёрнутое и уменьшенное. Так получается потому, что предметы, рассматриваемые глазом без напряжения, расположены за двойным фокусом системы роговица-хрусталик (помните случай $a > 2f$ для собирающей линзы?).

То, что изображение является действительным, понятно: на сетчатке должны пересекаться сами лучи (а не их продолжения), концентрируя световую энергию и вызывая раздражения палочек и колбочек.

Насчёт того, что изображение является уменьшенным, тоже вопросов не возникает. А каким же ему ещё быть? Диаметр глаза равен примерно 25 мм, а поле нашего зрения попадают

¹Изображение заимствовано с сайта «[Детская энциклопедия What This](#)».

предметы куда большего размера. Естественно, глаз отображает их на сетчатке в уменьшенном виде.

Но вот как быть с тем, что изображение на сетчатке является перевернутым? Почему же тогда мы видим мир не вверх ногами? Здесь подключается корректирующее действие нашего мозга. Оказывается, кора головного мозга, обрабатывая изображение на сетчатке, переворачивает картинку обратно! Это установленный факт, проверенный экспериментами.

Как мы уже сказали, хрусталик — это собирающая линза с переменным фокусным расстоянием. Но зачем хрусталику менять своё фокусное расстояние?

Аккомодация

Представьте себе, что вы смотрите на приближающегося к вам человека. Вы всё время чётко его видите. Каким образом глазу удаётся это обеспечивать?

Чтобы лучше понять суть вопроса, давайте вспомним формулу линзы:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

В данном случае a — это расстояние от глаза до предмета, b — расстояние от хрусталика до сетчатки, f — фокусное расстояние оптической системы глаза. Величина b является неизменной, поскольку это геометрическая характеристика глаза. Следовательно, чтобы формула линзы оставалась справедливой, вместе с расстоянием a до разглядываемого предмета должно меняться и фокусное расстояние f .

Например, если предмет приближается к глазу, то a уменьшается, поэтому и f должно уменьшаться. Для этого глазная мышца деформирует хрусталик, делая его более выпуклым и уменьшая тем самым фокусное расстояние до нужной величины. При удалении предмета, наоборот, кривизна хрусталика уменьшается, а фокусное расстояние возрастает.

Описанный механизм самонастройки глаза называется аккомодацией. Итак, *аккомодация* — это способность глаза отчётливо видеть предметы на различных расстояниях. В процессе аккомодации кривизна хрусталика меняется так, что изображение предмета всегда оказывается на сетчатке.

Аккомодация глаза совершается бессознательно и очень быстро. Эластичный хрусталик может легко менять свою кривизну в определённых пределах. Этим естественным пределам деформации хрусталика отвечает *область аккомодации* — диапазон расстояний, на которых глаз способен чётко видеть предметы. Область аккомодации характеризуется своими границами — дальней и ближней точками аккомодации.

*Дальняя точка аккомодации*² — это точка нахождения предмета, изображение которого на сетчатке получается при расслабленной глазной мышце, т. е. когда хрусталик не деформирован.

*Ближняя точка аккомодации*³ — это точка нахождения предмета, изображение которого на сетчатке получается при наибольшем напряжении глазной мышцы, т. е. при максимально возможной деформации хрусталика.

Дальняя точка аккомодации нормального глаза находится на бесконечности: в ненапряжённом состоянии глаз фокусирует параллельные лучи на сетчатке (рис. 2, слева). Иными словами, *фокусное расстояние оптической системы нормального глаза при недеформированном хрусталике равно расстоянию от хрусталика до сетчатки*.

Ближняя точка аккомодации нормального глаза расположена на некотором расстоянии d_{\min} от него (рис. 2, справа; хрусталик максимально деформирован). Это расстояние с возрастом увеличивается. Так, у десятилетнего ребёнка $d_{\min} \approx 7$ см; в возрасте 30 лет $d_{\min} \approx 15$ см; к 45 годам ближняя точка аккомодации находится уже на расстоянии 20–25 см от глаза.

² Другое название — *дальняя точка ясного видения*.

³ Другое название — *ближняя точка ясного видения*.

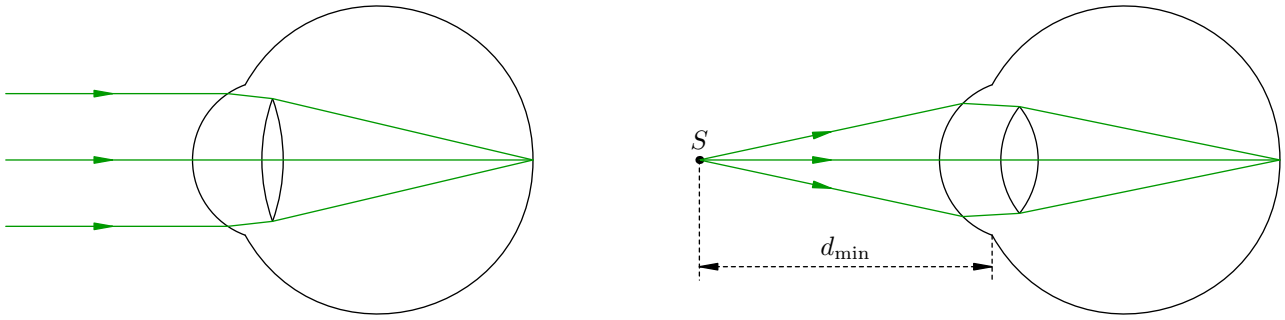


Рис. 2. Дальняя и ближняя точки аккомодации нормального глаза

Теперь мы переходим к простому, но очень важному понятию угла зрения. Оно является ключевым для понимания принципов работы различных оптических приборов.

Угол зрения

Когда мы хотим получше рассмотреть предмет, мы приближаем его к глазам. Чем ближе предмет, тем больше его деталей оказываются различимыми. Почему так получается?

Давайте посмотрим на рис. 3. Пусть стрелка AB — рассматриваемый предмет, O — оптический центр глаза. Проведём лучи AO и BO (которые не преломляются) и получим на сетчатке изображение нашего предмета — красную изогнутую стрелочку.

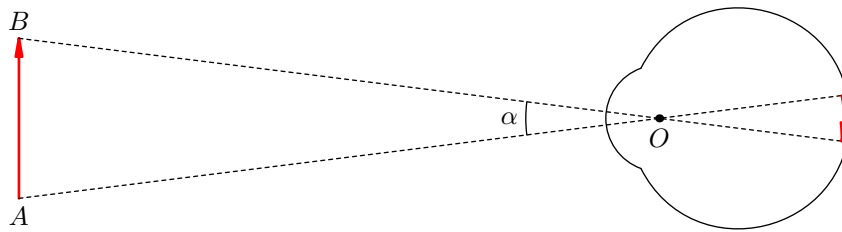


Рис. 3. Предмет далеко, угол зрения мал

Угол $\alpha = \angle AOB$ называется *углом зрения*. Если предмет расположен далеко от глаза, то угол зрения мал, и размер изображения на сетчатке также оказывается малым.

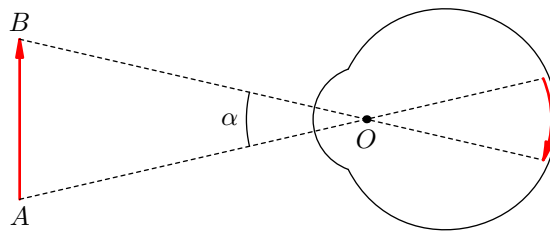


Рис. 4. Предмет близко, угол зрения велик

Но если предмет расположить ближе, то угол зрения увеличивается (рис. 4). Соответственно увеличивается и размер изображения на сетчатке. Сравните рис. 3 и рис. 4 — во втором случае изогнутая стрелочка оказывается явно длиннее!

Размер изображения на сетчатке — вот что важно для подробного разглядывания предмета. Сетчатка, напомним, состоит из нервных окончаний зрительного нерва. Поэтому чем крупнее изображение на сетчатке, тем больше нервных окончаний раздражается идущими от предмета световыми лучами, тем больший поток информации о предмете направляется по зрительному

нерву в мозг — и, следовательно, тем больше подробностей мы различаем, тем лучше мы видим предмет!

Ну а размер изображения на сетчатке, как мы уже убедились из рисунков 3 и 4, напрямую зависит от угла зрения: чем больше угол зрения, тем крупнее изображение. Поэтому вывод: *увеличивая угол зрения, мы различаем больше подробностей рассматриваемого объекта.*

Вот почему мы одинаково плохо видим как мелкие объекты, пусть и находящиеся рядом, так и крупные объекты, но расположенные далеко. В обоих случаях угол зрения мал, и на сетчатке раздражается небольшое число нервных окончаний. Известно, кстати, что если угол зрения меньше одной угловой минуты ($1/60$ градуса), то раздражается лишь одно нервное окончание. В этом случае мы воспринимаем объект просто как точку, лишённую деталей.

Расстояние наилучшего зрения

Итак, приближая предмет, мы увеличиваем угол зрения и различаем больше деталей. Казалось бы, оптимального качества видения мы достигнем, если расположим предмет максимально близко к глазу — в ближней точке аккомодации (в среднем это 10–15 см от глаза).

Однако мы так не поступаем. Например, читая книгу, мы держим её на расстоянии примерно 25 см. Почему же мы останавливаемся на этом расстоянии, хотя ещё имеется ресурс дальнейшего увеличения угла зрения?

Дело в том, что при достаточно близком расположении предмета хрусталик чрезмерно деформируется. Конечно, глаз ещё способен чётко видеть предмет, но при этом быстро утомляется, и мы испытываем неприятное напряжение.

Величина $d_0 = 25$ см называется *расстоянием наилучшего зрения* для нормального глаза. При таком расстоянии достигается компромисс: угол зрения уже достаточно велик, и в то же время глаз не утомляется ввиду не слишком большой деформации хрусталика. Поэтому с расстояния наилучшего зрения мы можем полноценно созерцать предмет в течении весьма долгого времени.

Близорукость

Напомним, что фокусное расстояние нормального глаза в расслабленном состоянии равно расстоянию от оптического центра до сетчатки. Нормальный глаз фокусирует параллельные лучи на сетчатке и поэтому может чётко видеть удалённые предметы, не испытывая напряжения.

Близорукость — это дефект зрения, при котором фокусное расстояние расслабленного глаза меньше расстояния от оптического центра до сетчатки. Близорукий глаз фокусирует параллельные лучи *перед* сетчаткой, и от этого изображения удалённых объектов оказываются размытыми (рис. 5; хрусталик не изображаем).

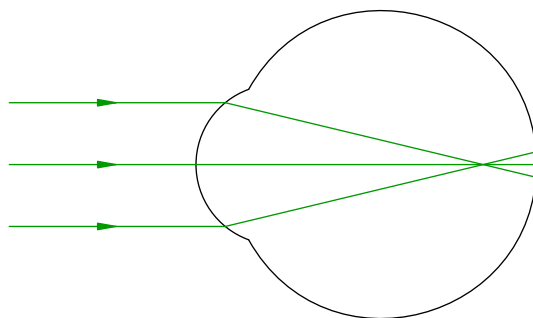


Рис. 5. Близорукость

Потеря чёткости изображения наступает, когда предмет находится дальше определённого расстояния. Это расстояние соответствует дальней точке аккомодации близорукого глаза. Та-

ким образом, если у человека с нормальным зрением дальняя точка аккомодации находится на бесконечности, то у близорукого человека дальняя точка аккомодации расположена на конечном расстоянии перед ним.

Соответственно, ближняя точка аккомодации у близорукого глаза находится ближе, чем у нормального. Расстояние наилучшего зрения для близорукого человека меньше 25 см.

Близорукость корректируется с помощью очков с рассеивающими линзами. Проходя через рассеивающую линзу, параллельный пучок света становится расходящимся, в результате чего изображение бесконечно удалённой точки отодвигается на сетчатку (рис. 6). Если при этом мысленно продолжить расходящиеся лучи, попадающие в глаз, то они соберутся в дальней точке аккомодации А.

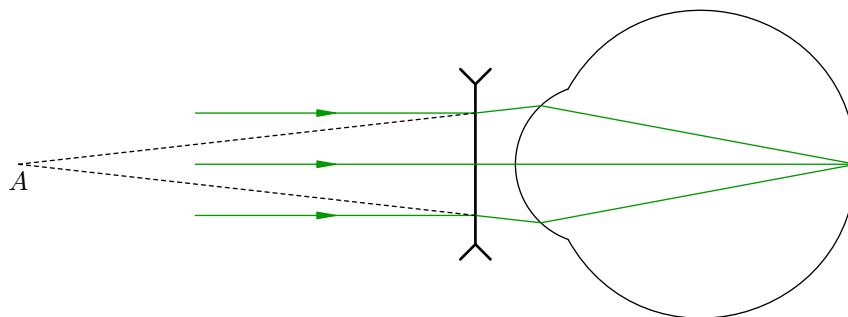


Рис. 6. Коррекция близорукости с помощью очков

Таким образом, близорукый глаз, вооружённый подходящими очками, воспринимает параллельный пучок света как исходящий из дальней точки аккомодации. Вот почему близорукый человек в очках может отчётливо рассматривать удалённые предметы без напряжения в глазах. Из рис. 6 мы видим также, что фокусное расстояние подходящей линзы равно расстоянию от глаза до дальней точки аккомодации.

Дальнозоркость

Дальнозоркость — это дефект зрения, при котором фокусное расстояние расслабленного глаза больше расстояния от оптического центра до сетчатки.

Дальнозоркий глаз фокусирует параллельные лучи за сетчаткой, отчего изображения удалённых объектов оказываются размытыми (рис. 7).

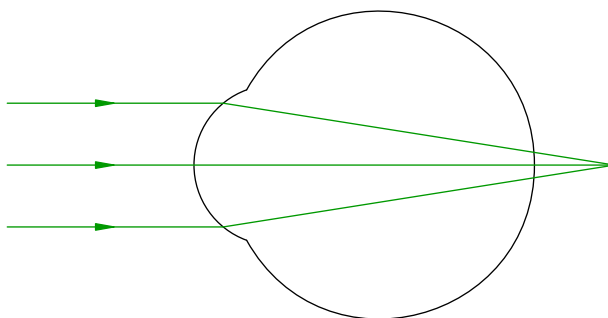


Рис. 7. Дальнозоркость

На сетчатке же фокусируется сходящийся пучок лучей. Поэтому дальняя точка аккомодации дальнозоркого глаза оказывается мнимой: в ней пересекаются мысленные продолжения лучей сходящегося пучка, попадающего на глаз (мы увидим это ниже на рис. 8).

Ближняя точка аккомодации у дальнозоркого глаза расположена дальше, чем у нормального. Расстояние наилучшего зрения для дальнозоркого человека больше 25 см.

Дальнозоркость корректируется с помощью очков с собирающими линзами. После прохождения собирающей линзы параллельный пучок света становится сходящимся и затем фокусируется на сетчатке (рис. 8).

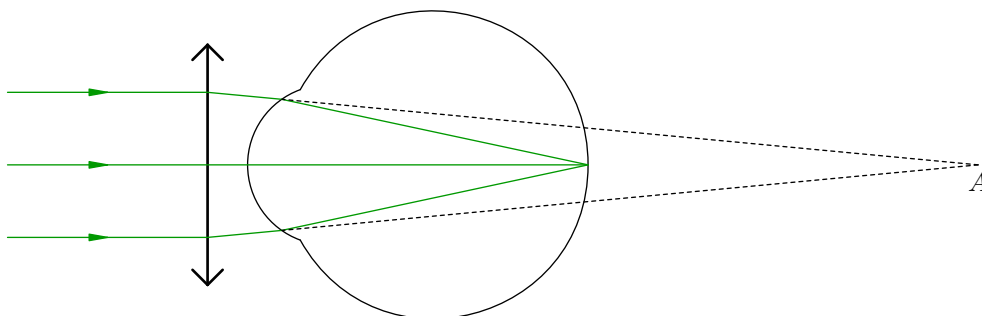


Рис. 8. Коррекция дальнозоркости с помощью очков

Параллельные лучи после преломления в линзе идут так, что продолжения преломлённых лучей пересекаются в дальней точке аккомодации A . Поэтому дальнозоркий человек, вооружённый подходящими очками, будет отчётливо и без напряжения рассматривать удалённые предметы. Мы также видим из рис. 8, что *фокусное расстояние подходящей линзы равно расстоянию от глаза до мнимой дальней точки аккомодации.*