

Глаз и его функции

1. Строение глаза. Аккомодация. Бинокулярное зрение.
2. Недостатки оптической системы глаза.
3. Угол зрения. Разрешающая способность. Острота зрения.
4. Акустическая биомеханика глаз.
5. Основные понятия и формулы.
6. Задачи.

Строение глаза. Аккомодация. Бинокулярное зрение

Глаз — воспринимающий отдел зрительного анализатора, служащий для восприятия световых раздражений. Через глаза человек получает до 90 % информации об окружающем мире.

Строение глаза показано на рис. 1.

1. **Склера** — достаточно прочная внешняя белковая оболочка, защищающая глаз от повреждений и придающая ему постоянную форму.

2. **Роговица** - передняя часть склеры, более выпуклая и прозрачная; действующая как собирающая линза с оптической силой $+ (42—43)$ дптр. Склера обеспечивает до 75 % фокусирующей способности глаза. Ее толщина 0,6—1 мм, а показатель преломления $n=1,38$.

3. **Сосудистая оболочка** — с внутренней стороны склера выстлана сосудистой оболочкой. Это очень тонкая перепонка, содержащая кровеносные сосуды. В передней части она утолщается и принимает форму кольца. Здесь-то и прикрепляется радужная оболочка и ресничная мышца.

4. **Пигментная оболочка**, содержащая темные пигментные клетки, препятствующие рассеиванию света в глазу.

5. **Радужная оболочка** — в передней части сосудистая оболочка переходит в окрашенную радужную оболочку, цвет которой определяет цвет глаз.

6. **Зрачок** — круглое отверстие в радужной оболочке, пропускающее свет. Диаметр зрачка может изменяться от 2 до 8 мм. Радужная оболочка и зрачок играют роль диафрагмы, регулирующей поступление света внутрь глаза.

7. **Хрусталик** — природная эластичная двояковыпуклая линза диаметром 8-10 мм и оптической силой $+ (20-30)$ дптр. Хрусталик имеет слоистую структуру с наибольшим показателем преломления $n = 1,41$; находится за радужной оболочкой.

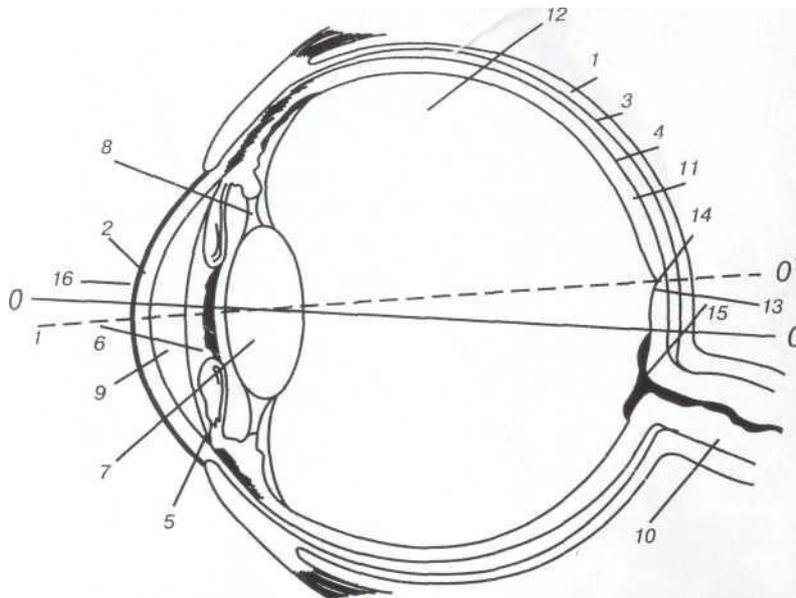


Рис. 1. Оптическая система глаза

8. **Кольцевая мышца** — мышца, которая охватывает хрусталик и может изменять кривизну его поверхностей. При сжатии кольцевой мышцы оптическая сила хрусталика увеличивается.

9. **Передняя камера** — камера с водянистой массой ($n = n_{\text{воды}}$), которая находится в передней части глаза между роговицей и хрусталиком, оптическая сила $+(2—4)$ дптр.

10. **Зрительный нерв**, обеспечивающий передачу зрительной информации в мозг. Подходя к глазу, он разветвляется, образуя на задней стенке сосудистой оболочки светочувствительный слой — сетчатку.

11. **Сетчатка** — светочувствительный слой, воспринимающий свет и преобразующий его в нервные импульсы. Сетчатка представляет собой разветвление зрительного нерва с нервными окончаниями в виде палочек и колбочек.

Колбочки (их примерно 10 млн) служат для восприятия мелких деталей предмета и различения цветов; диаметр колбочки 7 мкм, длина около 35 мкм.

Палочки (120 млн клеток) не воспринимают различия в цвете и мелкие детали, но они высокочувствительны к слабому свету, с помощью палочек человек различает предметы в сумерках и ночью. Диаметр палочки 2 мкм, а длина 6 мкм.

Палочки и колбочки распределены неравномерно: в средней части сетчатки преобладают колбочки, а по краям — палочки. Чувствительность сетчатки очень высока: свет обыкновенной свеч виден на расстоянии нескольких километров.

12. **Стекловидное тело** — студенистое вещество, заполняющее пространство между хрусталиком и сетчаткой (задняя глазная камера) Оптическая сила — $(5—6)$ дптр.

13. **Желтое пятно** (*макула*) — самая чувствительная область сетчатки, площадью около 3 мм^2 . Человек видит ясно те предметы, изображение которых проецируется на желтое пятно.

14. **Центральная ямка** — наиболее чувствительная часть желтого пятна. Это область диаметром примерно полмиллиметра, в которой сетчатка углублена. Здесь палочки совсем отсутствуют, а концентрация колбочек максимальна.

15. **Слепое пятно** — расположено в том месте, где зрительный нерв входит в глаз. Здесь нет ни палочек, ни колбочек, и лучи, попадающие на эту область, не вызывают световых ощущений (отсюда и название «слепое пятно»).

16. **Конъюнктивa** — наружная оболочка глаза, выполняет барьерную и защитную роль.

Свет, падающий на колбочки и палочки, вызывает в них химические превращения. Благодаря этому в нервном волокне, соединяющем светочувствительные клетки глаза с мозгом, возникают электрические импульсы.

Получение зрительной информации о рассматриваемом предмете — сложный психофизический процесс. Поле ясного зрения определяется размерами желтого пятна и составляет около 8° по горизонтали

тали и 6° по вертикали. Все, что проецируется на периферическую часть сетчатки, воспринимается в виде смутных деталей. Однако глаз обладает способностью быстро перемещаться (поворачиваться) в своей орбите, сканируя рассматриваемый объект. Этот процесс протекает под управлением мозга. Поэтому глаз может задерживаться на тех деталях, которые представляют интерес, возвращаться к ним при необходимости. Благодаря этому человек, не поворачивая головы, может обозревать сектор $120\text{—}150^\circ$ по вертикальному и горизонтальному направлениям. Это больше, чем у хороших оптических инструментов.

Светопроводящий аппарат глаза образован роговицей, жидкостью передней камеры, хрусталиком и стекловидным телом. Первые три элемента подобны собирающим линзам, а последний - рассеивающей. Глаз — центрированная оптическая система, **главная оптическая ось** (OO') которой проходит через центры роговицы, зрачка, хрусталика. **Оптическая сила глаза** складывается из оптических сил всех перечисленных элементов. При полностью расслабленной кольцевой мышце оптическая сила глаза - около +60 дптр, при максимальном напряжении кольцевой мышцы (рассматривании близких предметов) $D > +70$ дптр.

Направление наибольшей чувствительности глаза определяет его **зрительная ось** ($O'O'$), которая проходит через центры роговицы и желтого пятна. В направлении этой оси глаз имеет наилучшую разрешающую способность. Угол между оптической и зрительной осью составляет 5° .

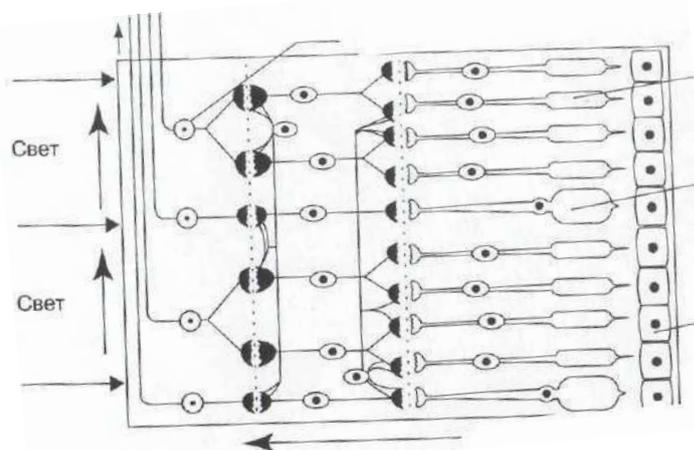
Световоспринимающим (рецепторным) аппаратом глаза является сетчатка, в которой находятся светочувствительные зрительные клетки.

Сетчатка — это часть мозга, отделившаяся от него на ранних стадиях развития, но все еще связанная с ним посредством пучка волокон - зрительного нерва. Она имеет форму пластинки толщиной приблизительно в четверть миллиметра. Светочувствительные клетки (палочки и колбочки), являющиеся фоторецепторами, расположены на задней поверхности сетчатки (рис.).

Таким образом, фоторецепторы самого глубокого слоя сетчатки воспринимают свет и передают импульсы на ганглиозные клетки. Их аксоны проходят по поверхности сетчатки и собираются в пучок у слепого пятна, образуя волокна зрительного нерва. Позади рецепторов находится слой клеток, содержащих черный пигмент меланин, который поглощает свет, прошедший через сетчатку, не давая ему, отразиться назад и рассеиваться внутри глаза.

Нервные волокна, которые
Направляются от сетчатки и
Входят в состав зрительного
Нерва

клетки ганглиозные



Аккомодация

К глазу (с некоторыми ограничениями) применима формула линзы: $D=1/a_1 + 1/a_2$. Действительное изображение предмета, даваемое светопроводящим аппаратом глаза, проецируется на сетчатку, которая играет роль экрана. Расстояние от сетчатки до всех элементов светопроводящего аппарата практически постоянно ($a_2 = \text{const}$). В этом случае обеспечить резкость изображения различно удаленных предметов можно единственным способом: изменять оптическую силу глаза D при изменении расстояния a_1 . Эту задачу решает кольцевая мышца, которая при напряжении увеличивает кривизну хрусталика, увеличивая тем самым оптическую силу. Процесс «наводки на резкость» называется **аккомодацией**. **Аккомодация** — приспособление глаза к четкому видению различно удаленных предметов.

В норме глаз человека обеспечивает четкое видение предметов, удаленных от него на расстояния от 12 см до ∞ . Ближний предел аккомодации (12 см) связан с

максимальным напряжением *кольцевой мышцы*. Такое напряжение вызывает быстрое утомление. Принято считать, что у взрослого человека с нормальным зрением аккомодация осуществляется без существенного напряжения на расстояние до 25 см. Это расстояние называется *расстоянием наилучшего зрения (видения)* — a_0 . Дальнему пределу аккомодации a_d соответствует полное расслабление кольцевой мышцы и минимальная кривизна хрусталика. В норме $a_d = \infty$.

Отметим, что у некоторых животных, например у рыб, шарообразный хрусталик не изменяет своей кривизны, а перемещается под действием мышц вперед или вглубь глазного яблока, подобно объективу фотоаппарата.

Бинокулярное зрение.

Два глаза — это два одинаковых органа зрения, расположенные на некотором расстоянии друг от друга и формирующие единый зрительный образ предмета. Способность к формированию единого образа из двух изображений называется *бинокулярным зрением* (*bini* — по два, *oculus* — глаз).

Основное назначение бинокулярного зрения - формирование *трехмерного* образа предмета. Благодаря бинокулярному зрению мы ощущаем три измерения: ширину, высоту, глубину; отличаем предметы близкие от далеких. Один глаз воспринимать глубину и разницу в расстояниях *неспособен*.

Механизм восприятия разницы в расстояниях заключается в следующем. Когда мы фокусируем взгляд на какой-либо точке, глазные яблоки поворачиваются так, чтобы на нее были направлены зрительные оси обоих глаз (рис. 3). Чем ближе находится точка, тем

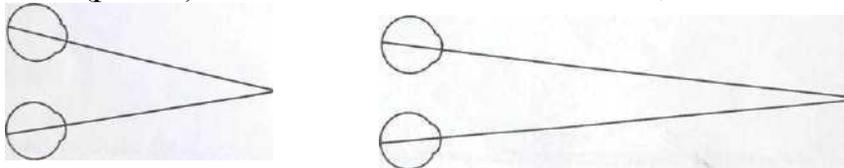


рис. 3. Сведение зрительных осей на близкой (а) и далёкой (б) точках.

больше угол сведения осей и тем больше напряжение глазных мышц. Величина этого напряжения и является тем признаком, по которому мозг оценивает удаленность предметов, особенно не знакомых нам;

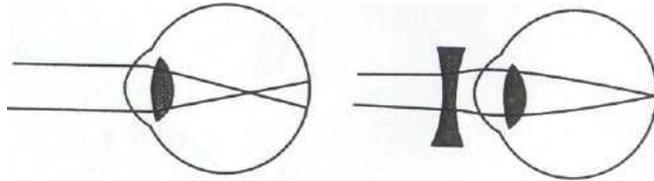
Недостатки оптической системы глаза

Близорукость и дальнозоркость

К самым распространенным дефектам зрения относятся близорукость (миопия) и дальнозоркость (гиперметропия), связанные излишней или недостаточной выпуклостью хрусталика.

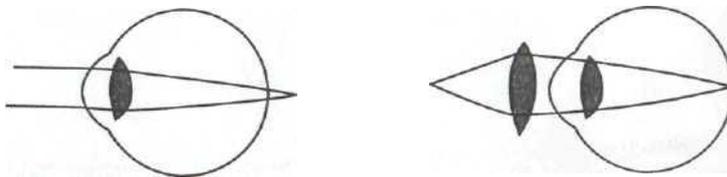
Если хрусталик излишне выпукл, то оптическая сила глаза превышает норму. В этом случае положение заднего фокуса при ненапряженной кольцевой мышце оказывается перед сетчаткой (рис. 4, а),

Такой глаз не может четко видеть удаленные предметы. Даже при небольшой степени миопии **дальний предел аккомодации** уменьшается до нескольких десятков сантиметров (у нормального глаза он равен бесконечности). Ближний предел аккомодации при этом также уменьшается. Близорукий человек выполняет тонкую работу лучше, чем человек с нормальным зрением. Вот почему среди потомственных ювелиров близорукость обычное явление. Для компенсации близорукости используют очки с рассеивающими линзами.



а Близорукий глаз

а Близорукий глаз



б Дальнозоркий глаз

Рис. 4. Компенсация близорукости (а) и

Если выпуклость хрусталика недостаточна, то оптическая сила глаза меньше нормы. В этом случае положение заднего фокуса при ненапряженной кольцевой мышце оказывается за сетчаткой (рис. б). Дальновзоркий глаз может четко видеть удаленные предметы только при напряжении кольцевой мышцы (это быстро утомляет). Ближний предел аккомодации при гиперметропии существенно превышает 25 см. Соответственно возрастает **линейный предел разрешения**. Человек теряет возможность выполнять тонкую работу. Возникают проблемы и при чтении. Для компенсации дальновзоркости используют очки с собирающими линзами.

Оптические силы компенсирующих очков и контактной линзы **различны**. Это связано с тем, что контактная линза располагается **вплотную** к глазу, а линза очков **удалена** от него на некоторое расстояние $h \ll 2$ см. Покажем, как определить оптическую силу компенсирующей линзы для этих двух случаев. Пусть ближний предел аккомодации у дальновзоркого глаза равен 60 см ($a = 60$). При компенсации с помощью очков или контактной линзы глаз видит не сам предмет, а его **мнимое изображение** (рис. 5).

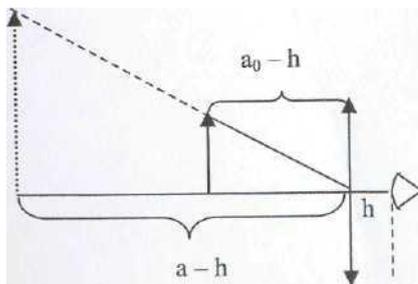


Рис. Расчет оптической силы очков

Это изображение должно находиться на расстоянии $a = 60$ см от глаза, когда предмет расположен на расстоянии $a_0 = 25$ см (расстояние наилучшего зрения в норме). Для линзы соответствующие расстояния равны: $a_2 = a - h = 58$ см = 0,58 м и $a_1 = a_0 - h = 23$ см = 0,23 м. По формуле линзы найдем оптическую силу компенсирующих очков:

$$D = 1/a, - 1/a_2 = 1/0,23 - 1/0,58 = +2,62 \text{ дптр.}$$

При использовании контактной линзы $h=0$.

В этом случае: $D = 1/0,25 - 1/0,60 = +2,33$ дптр.

Очки или контактные линзы лишь **компенсируют** близорукость и дальновзоркость. **Лечение** этих недостатков зрения возможно только хирургическим путем. В настоящее время достаточно хорошо отработана методика лечения путем коррекции формы роговицы с помощью лазерного луча. При этом, например, избыточность оптической силы хрусталика (миопия) компенсируют путем уменьшений кривизны роговицы.

Пресбиопия

Другим распространенным недостатком зрения является **пресбиопия** - возрастное ослабление способности глаза к аккомодации (иногда ее неправильно называют старческой дальновзоркостью). Пресбиопия связана с

возрастным уменьшением эластичности хрусталика и ослаблением кольцевой мышцы. При этом *увеличивается* ближний предел аккомодации. Дальний предел аккомодации *остаётся неизменным*.

При пресбиопии невозможно получение на сетчатке четкого изображения близко расположенных предметов. Обычно речь идет об объектах зрительной работы — текстах, экранах и т.п. Для компенсации пресбиопии используют «очки для чтения». У человека с нормальной формой глаза это очки с положительной оптической силой. У дальнозоркого человека это очки с большей оптической, чем для наблюдения удаленных предметов. У близорукого это очки с меньшей оптической силой, чем у очков, которыми он пользуется обычно.

Астигматизм

Аберрации, свойственные обычным линзам, у глаз почти не проявляются. *Сферическая аберрация* весьма незначительна, так как ограничивает приосевой пучок света. *Сферическая аберрация* в хрусталике не проявляется, так как его оптическая плотность в центре, чем на периферии. *Хроматическая аберрация* не проявляется по ряду причин, в том числе и из-за малости расстояния между узловой точкой и сетчаткой — по-разному преломленные лучи просто не успевают разойтись на значительное расстояние. Отсутствует и астигматизм *косых лучей*, так как оптическая ось глаза всегда устанавливается в направлении наблюдаемого объекта.

Единственный недостаток светопроводящего аппарата присущий обычным оптическим системам, *это астигматизм*, обусловленный его *асимметрией*. В норме поверхность роговицы и поверхность хрусталика являются сегментами почти идеальных сфер. Однако у некоторых людей кривизна одной или обеих этих поверхностей в одной плоскости оказывается большей, чем в другой. В офтальмологии этот дефект и называют *астигматизмом*. При астигматизме глаз не способен видеть взаимно перпендикулярные линии одинаково резко.

Для компенсации астигматизма используют «цилиндрические» линзы, асимметрия которых противоположна асимметрии глаза.

Угол зрения. Разрешающая способность. Острота зрения.

При построении изображения, даваемого глазом на сетчатке, используют узловую точку N, которая аналогична оптическому центру тонкой линзы (рис. 6).

Размер изображения зависит только от угла β , под которым виден предмет. Этот угол называют *углом зрения*:

$$b = l \cdot \operatorname{tg} \beta$$

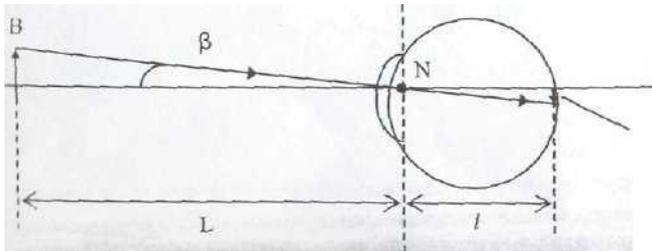
где $l = 17$ мм — расстояние от узловой точки до сетчатки.

Угол зрения \sim угол между лучами, идущими от крайних точек предмета через узловую точку (оптический центр глаза).

$\operatorname{tg} \beta = B/L = b/l$. Учитывая эти соотношения можно записать следующую

формулу для размера изображения: $b = VI/L$

Для малых углов зрения ($\beta < 0,1$ рад) справедлива приближенная формула; $\text{tg } \beta \approx \beta$.



Изображение на сетчатке (размер $-b$)

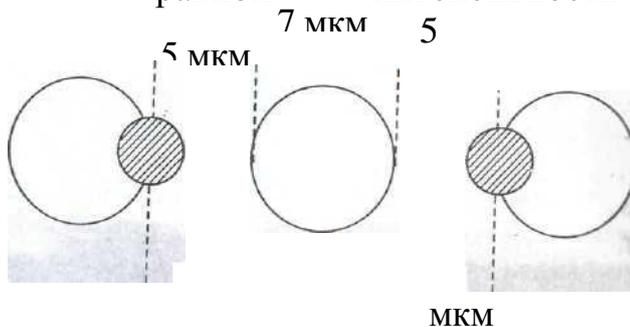
Разрешающая способность

Разрешающая способность глаза — это величина, характеризующая его способность давать раздельное изображение двух близких друг к другу точек объекта. Наименьшее линейное (или угловое) расстояние между двумя точками, при котором их изображения воспринимаются раздельно, называется линейным (или угловым) **пределом разрешения**.

Угловой предел разрешения — наименьший угол зрения, при котором человеческий глаз еще различает две точки предмета раздельно. Обратим внимание на то, что понятие *углового предела разрешения* заимствовано из оптики, где оно применяется к *изображениям* том Поэтому корректное применение этого понятия к глазу допустимо лишь тогда, когда точки находятся *в пределах аккомодации* глаза. В этом случае угловой предел разрешения глаза не зависит от таких дефектов, как близорукость или дальнозоркость, и определен свойствами сетчатки и диаметром зрачка.

Принято считать, что для глаза, способного к аккомодации угловой предел разрешения равен Γ ($3 \cdot 10^{-4}$ рад.). При этом исходят из следующих соображений. Две точки предмета будут различимы, если их изображения попадают в *соседние* колбочки сетчатки. Расстояние между соседними колбочками $b = 5 \text{ мкм} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. По формуле (найдем угловое расстояние между такими точками, учитывая малость ($\text{tg} \ll \rho$):

$\rho \ll b/l = 5 \cdot 10^{-6} / 17 \cdot 10^{-3} \gg 3 \cdot 10^{-4}$ рад * 1 угловая минута. В действительности эта оценка занижена. Раздражение двух ее *них* колбочек светом равной интенсивности не создаст двух



и.ных образов. Для создания отдельных образов необходимо, чтобы между двумя освещенными колбочками находилась хотя бы одна колбочка, которая не испытывает светового раздражения. Этот случай изображен на рис. 24.7, где показаны три колбочки диаметром 7 мкм, расстояние между которыми равно 5 мкм. Изображение точки вследствие дифракции света на зрачке имеет вид заштрихованного кружка (дифракционное пятно). Центры дифракционных пятен расположены на краях колбочек.

Видно, что в этом случае расстояние между центрами изображений σ' равно 17 мкм. Этому расстоянию соответствует угол зрения $\alpha' = \sigma' / b = 17 \times 10^{-6} / 17 \times 10^{-3} \text{ рад.} \approx 3,4 \text{ угловых минуты.}$

Полученное выше значение (1 угловая минута) может быть реализовано в том случае, когда в соседние колбочки попадают изображения двух точек с *различной яркостью*. При этом возникают нервные импульсы различной величины. Однако этот случай относится скорее к способности глаза различать контрастные детали. На практике принято считать, что угловое разрешение глаза лежит в пределах 2—4 угловые минуты.

В качестве линейной характеристики разрешающей способности используют *линейный предел разрешения*.

Линейный предел разрешения глаза (Z) — наименьшее расстояние между двумя точками предмета, рассматриваемого с расстояния наилучшего зрения, при котором они различимы отдельно.

Острота зрения

В офтальмологии способность глаза к дальней аккомодации характеризуют *остротой зрения* (V). При этом с помощью специальной таблицы определяют способность глаза опознавать стандартные символы (буквы) в зависимости от их величины. Остроту зрения для нормального глаза принимают за *единицу* ($V = 1$). Испытуемый находится на определенном расстоянии от таблицы и рассматривает предлагаемые врачом символы одним глазом. Поделенный на номер строки, которую испытуемый распознает еще безошибочно, является остротой зрения. Например, $V = 0,3$, если испытуемый без ошибок читает третью строку таблицы. Обратите внимание на то, здесь определяется способность распознавать *нечеткие* (несфокусированные) изображения. Норме соответствует чтение *десятой* строки. Если размер ее символов принять за *единицу*, то размеры символов по мере продвижения вверх равны: 2, 3, ..., 10. Это позволяет записать следующую формулу для остроты зрения:

$$V = P_{\text{НОР}} / P$$

Острота зрения равна отношению минимального углового размера символа, распознаваемого нормальным глазом, к угловому размеру символа, распознаваемого пациентом.