ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Лекция 2.2 «Типы оптических деталей поверхностей»

ВВЕДЕНИЕ. МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ИХ РОЛЬ В КОРРЕКЦИИ ЗРЕНИЯ

Качество формирования оптического изображения в любом оптическом приборе, а в особенности в средствах офтальмологической коррекции (очковых и контактных линзах), всецело определяется геометрической формой и точностью изготовления преломляющих и отражающих поверхностей.

В классической прикладной оптике под **оптической поверхностью** понимают границу раздела двух прозрачных изотропных сред с различными абсолютными показателями преломления n и n', обладающую высокой степенью полировки (шероховатость $R_z <$ 0,025 мкм). По геометрии генератрисы (образующей линии) и симметрии вращения все оптические поверхности подразделяются на два фундаментальных класса:

1. **Сферические поверхности:** поверхности, образованные вращением дуги окружности фиксированного радиуса r вокруг главной оптической оси. Исторически и технологически они являются наиболее освоенными в массовом производстве благодаря естественному процессу взаимной притирки (*гладжения*) сопряженных абразивных деталей.
2. **Асферические поверхности:** поверхности сложного профиля, не являющиеся частью сферы (эллипсоиды, параболоиды, гиперболоиды вращения, поверхности высших порядков, торические и прогрессивные мультифокальные поверхности). Они лишены главного недостатка сфер — сферической аберрации и краевых искажений, что делает их незаменимыми в современной высокоточной очковой оптики и прецизионном приборостроении.

Настоящая лекция посвящена детальному физическому анализу сфер и асфер, выводу расчетных формул для очковых линз, методам компенсации аберраций глаза и алгоритмам расчета параметров корригирующих линз в соответствии с международными офтальмологическими стандартами.

1. СФЕРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ: ГЕОМЕТРИЯ, ПАРАКСИАЛЬНЫЙ АППАРАТ И ОГРАНИЧЕНИЯ

1.1. Геометрические параметры сферы

Сферическая поверхность характеризуется следующими конструктивными параметрами:

- **Радиус кривизны (r):** расстояние от вершины поверхности S до центра кривизны C. В соответствии со стандартом **ГОСТ 7427-78**, радиус считается положительным ($r > 0$), если центр кривизны лежит справа от вершины по ходу луча, и отрицательным ($r < 0$), если центр лежит слева.
- **Стрелка прогиба поверхности (h или сагиттальное расстояние x):** расстояние от плоскости, проходящей через край апертуры диаметром D перпендикулярно

оптической оси, до вершины поверхности. Из теоремы Пифагора для сферы радиуса r сагитта $x(y)$ на высоте y от оси выражается точной формулой:

$$x(y) = r - \sqrt{r^2 - y^2} = \frac{y^2}{r + \sqrt{r^2 - y^2}}$$

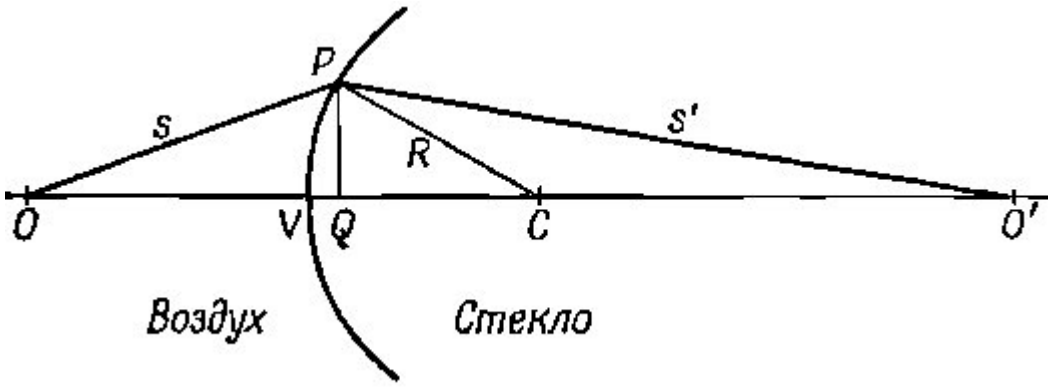
Разлагая корень в биномиальный ряд для параксиальной области ($y \ll r$), получаем классическое приближение:

$$x(y) \approx \frac{y^2}{2r} + \frac{y^4}{8r^3} + \dots$$

1.2. Оптическая сила сферической преломляющей поверхности

Рассмотрим преломление параксиального луча на одиночной сферической поверхности радиуса r, разделяющей среды с показателями преломления n и $n\prime$.

Рис. 1. Ход луча через сферическую преломляющую границу: сопряжение точек предмета s и изображения $s' через радиус кривизны r.



Параксиальный инвариант преломления сферической границы выводится из закона Снеллиуса и геометрии треугольников (через внешние углы):

$$\frac{n\prime}{s\prime} - \frac{n}{s} = \frac{n\prime - n}{r}$$

Оптическая сила сферической преломляющей поверхности (D):

$$D = \frac{n\prime - n}{r}$$

Из формулы следует, что преломляющая способность сферы прямо пропорциональна разности показателей преломления сред и обратно пропорциональна радиусу кривизны. Чем круче кривизна (меньше радиус r), тем выше оптическая сила поверхности.

1.3. Аберрации сферических поверхностей в очковой оптике

Главным физическим недостатком сферических поверхностей является их неспособность обеспечивать стигматическое изображение для широких внеосевых пучков света. В очковой оптике это проявляется в виде двух критических аберраций:

1. **Сферическая аберрация:** краевые лучи широкого пучка пересекают оптическую ось ближе к линзе, чем параксиальные лучи. Пациент ощущает смазывание контуров и снижение контраста.
2. **Астигматизм наклонных пучков (кривизна поля / аберрация Петцваля):** При взгляде в сторону (через периферическую зону очковой линзы) лучи падают под наклоном. Сферическая поверхность разделяет гомоцентрический пучок на две перпендикулярные фокальные линии — сагиттальную и меридиональную. Вместо резкой точки на сетчатке формируется эллиптическое пятно рассеяния.

2. АСФЕРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ: КЛАССИФИКАЦИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Для устранения аберраций на периферии поля зрения в очковой и прикладной оптике применяют **асферические поверхности**.

2.1. Каноническое уравнение асферической поверхности вращения

Геометрический профиль (меридиональное сечение) осесимметричной асферической поверхности в декартовой системе координат задается каноническим уравнением 2-го порядка с полиномиальной коррекцией высших степеней:

$$x(y) = \frac{y^2}{r\left(1 + \sqrt{1 - (1+k)\frac{y^2}{r^2}}\right)} + A_4 y^4 + A_6 y^6 + A_8 y^8 + A_{10} y^{10} + \dots$$

где:

- $x(y)$ — сагиттальная стрелка прогиба поверхности на высоте y от оптической оси;
- r — радиус кривизны при вершине поверхности ($y = 0$);
- k — **коническая постоянная (эксцентриситет)**, определяющая тип поверхности второго порядка;
- $A_4, A_6, A_8, \dots$ — коэффициенты асферичности высших порядков, плавно сглаживающие краевой профиль для минимизации волновых аберраций.

2.2. Классификация асферических поверхностей по конической постоянной (k)

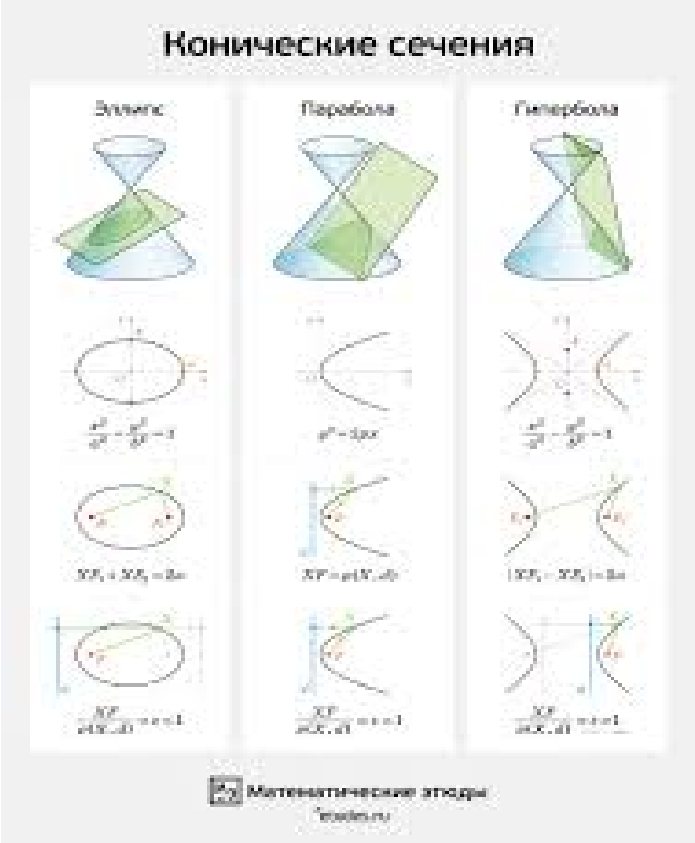
В зависимости от значения конического параметра k образующая линия представляет собой коническое сечение:

ТИПЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ (k):

Значение параметра	Название кривой	Оптические свойства и применение
k = 0	Сфера	Одинаковая кривизна во всех сечениях
-1 < k < 0	Эллипс (вытянутый)	Фокусировка лучей из одного фокуса в другой
k = -1	Параболоид	Полное устранение сферической аберрации
k < -1	Гиперболоид	Преобразование сходящегося пучка в расходящийся

k > 0	Уплощенный эллипс	Уменьшение кривизны по краям апертуры

Рис. 2. Конические сечения вращения: парабола, эллипс, гипербола.



3. ПРИМЕНЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ И АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ОЧКОВОЙ ОПТИКЕ

Очковые линзы выполняют задачу коррекции аномалий рефракции глаза (миопии, гиперметропии, пресбиопии и астигматизма). Исторически первые очковые линзы изготавливались с обеими сферическими поверхностями. Однако пациент при переводе взгляда в сторону испытывал колоссальное утомление из-за краевого астигматизма.

3.1. Очковые линзы Беннета (Айзенбарта): Сферические апланатические линзы

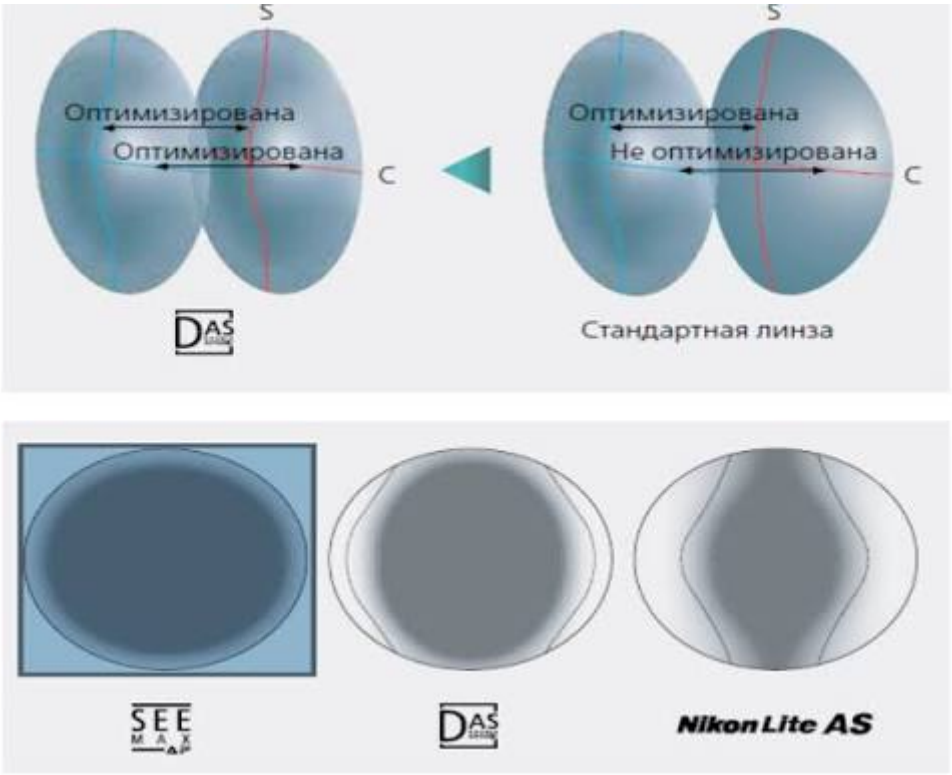
Для минимизации астигматизма наклонных пучков и дисторсии в сферических очковых линзах рассчитывают оптимальное соотношение кривизн передней и задней поверхностей — так называемые **апланатические (минимально аберрационные) формы очковых линз по Беннету**.

В таких линзах задняя поверхность (обращенная к роговице глаза) имеет кривизну, подобранную под среднее расстояние вращения глазного яблока (около 27 мм от вершины линзы), что обеспечивает сохранение резкости изображения при сканировании взглядом в пределах поля зрения 30–40°.

3.2. Преимущества асферических очковых линз

Внедрение прецизионной алмазной токарной обработки и компьютерного моделирования позволило массово производить **асферические очковые линзы** (преимущественно с асферизацией передней поверхности для плюсовых линз и задней — для минусовых).

Рис. 3. Уменьшение толщины, массы и краевых искажений в асферической линзе по сравнению со сферическим аналогом.



Физико-оптические и эстетические преимущества асферики:

1. **Устранение краевого астигматизма и сферической аберрации:** изображение остается предельно резким по всей периферии сетчатки при движении глаз.
2. **Косметическое улучшение (уменьшение искажения масштаба лица):**
   – У пациентов с гиперметропией (+ диоптрии) сферические линзы сильно увеличивают глаза («глаза на выкате»). Асферический дизайн позволяет уменьшить толщину и кривизну передней поверхности, убирая этот дефект.
   – У пациентов с миопией (- диоптрии) сферические линзы уменьшают глаза («эффект замочной скважины»). Асферические линзы тоньше, легче и имеют плоский профиль.
3. **Уменьшение массы и толщины:** плоский профиль асферической линзы снижает ее вес на 20–35%.

3.3. Торические и прогрессивные линзы (Сложные поверхности)

- **Торические поверхности:** обладают двумя взаимно перпендикулярными главными сечениями с различными радиусами кривизны ($r_x \neq r_y$). Применяются для коррекции **роговичного астигматизма** (цилиндрические и сфероцилиндрические линзы).

- **Прогрессивные мультифокальные линзы (PAL):** вершина инженерного искусства очковой оптики. Поверхность линзы имеет непрерывно изменяющуюся оптическую силу по вертикальному меридиану (плавный переход от зоны для дали в верхней части через коридор прогрессии к зоне для близи в нижней части). Это достигается за счет сложнейшей **асимметричной асферической поверхности высших порядков**.

4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОРРИГИРУЮЩИХ ЛИНЗ (ОПТОМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ)

Расчет параметров очковой линзы (оптометрический синтез) включает определение задней вергентности, пересчет на вертексное расстояние и учет толщины материала.

4.1. Понятие вертексной рефракции (Вертексы и Вергентность)

Очковая линза характеризуется не традиционным фокусным расстоянием от главных плоскостей (положение которых внутри тонкой линзы неопределенно), а **вертексной рефракцией (*Rv* или *Sv*)** — оптической силой линзы, измеренной в диоптриях относительно ее передней или задней вершины (S_1 или S_2).

- **Задняя вертексная рефракция (*Sv′*):** величина, обратная переднему фокусному расстоянию, отсчитываемому от **задней вершины** линзы:

$$Sv' = \frac{1}{s'_{F'_2}}$$

  Именно это значение указанно в рецепте врача-офтальмолога и измеряется на диоптриметре (фотометре).

4.2. Расчет формулы шлифовщика для очковой линзы

Для толстой линзы с осевой толщиной d, показателем преломления n и радиусами кривизны r_1 и r_2 задняя вертексная рефракция определяется строгим инженерным уравнением:

$$Sv' = \frac{n-1}{r_2} + \frac{\frac{n-1}{r_1}}{1 - \frac{d}{n}\frac{n-1}{r_1}}$$

Обозначив оптические силы поверхностей как $D_1 = \frac{n-1}{r_1}$ и художников $D_2 = \frac{n-1}{r_2}$, получаем компактную формулу:

$$Sv' = D_2 + \frac{D_1}{1 - \frac{d}{n}D_1}$$

Для тонкой линзы ($d \to 0$):

$$Sv' \approx D_1 + D_2 = D$$

4.3. Пересчет вертексной рефракции при изменении вертексного расстояния

Если очковая линза изготавливается для ношения на определенном расстоянии от роговицы глаза (стандартное вертексное расстояние для очков $l = 12$ мм, а для контактных линз $l = 0$ мм), то при больших диоптриях ($> \pm 4{,}00$ дптр) требуется строгий пересчет рефракции.

Пусть $D_{кор}$ — требуемая оптическая сила на роговице ($l = 0$), а $D_{оч}$ — оптическая сила очковой линзы на расстоянии l от роговицы.

Условие сопряжения волнового фронта дает формулу пересчета вертексной рефракции:

$$D_{оч} = \frac{D_{кор}}{1 - l \cdot D_{кор}}$$

Практический пример:

Пациенту с высокой миопией требуется коррекция на роговице $D_{кор} = -10{,}0$ дптр. Очки носятся на расстоянии $l = 0{,}012$ м (12 мм). Рассчитаем оптическую силу очковой линзы:

$$D_{оч} = \frac{-10{,}0}{1 - (0{,}012 \cdot (-10{,}0))} = \frac{-10{,}0}{1 + 0{,}12} = \frac{-10{,}0}{1{,}12} \approx -8{,}93 \text{ дптр}$$

Для компенсации миопии на расстоянии 12 мм от глаза требуется очковая линза силой −8,93 дптр (а не −10,0 дптр, как на роговице).

5. ИНЖЕНЕРНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОЧКОВОЙ ЛИНЗЫ

При проектировании и лабораторном изготовлении корригирующей линзы оптик-инженер выполняет следующую последовательность расчетов:

АЛГОРИТМ ОПТОМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ОЧКОВОЙ ЛИНЗЫ:
1. Анализ рецептурных данных:
  • Определение задней вертексной рефракции (Sv') для сферы и цилиндра (с учетом оси).
  • Учет вертексного расстояния (l) при рефракциях > ±4.00 дптр.
  ↓
2. Выбор материала и показателя преломления (n):
  • Стандартный органический пластик (CR-39, n = 1.50);
  • Высокоиндексные материалы (Mid-index n = 1.60; High-index n = 1.67, 1.74; Поликарбонат n = 1.59).
  ↓
3. Выбор базовой кривизны (передней поверхности D1):
  • Использование таблиц оптимальных базовых кривизн (по Беннету или Цигелю) для минимизации аберраций.
  ↓
4. Расчет радиуса и кривизны второй (задней) поверхности (D2 / r2):
  • Из формулы шлифовщика для толстой линзы: D2 = Sv' - (D1 / (1 - (d/n)D1)).
  • Вычисление радиуса r2 = (n - 1) / D2.
  ↓
5. Проверка геометрических параметров и допусков:
  • Контроль центральной и краевой толщины (d, t_edge) во избежание механической хрупкости.
  • Расчет массы линзы и аберрационного поля.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ ВЫВОДЫ

1. **Морфологическая дихотомия поверхностей:** Сферические поверхности обладают технологической простотой изготовления, но принципиально ограничены наличием сферической аберрации и астигматизма наклонных пучков. Асферические поверхности устраняют эти ограничения за счет использования конических сечений вращения и полиномиальных поправок.

2. **Аберрационная оптимизация очковой оптики:** Переход к апланатическим формам линз (по Беннету) и современным асферическим дизайнам обеспечивает высокую остроту зрения по всей периферии сетчатки, одновременно решая эстетические задачи уменьшения массы и толщины очков.
3. **Физическая строгость оптометрических расчетов:** Расчет параметров корригирующих линз опирается на точные уравнения вертексной рефракции толстых линз и законы геометрического сопряжения волновых фронтов с учетом вертексного расстояния l.
4. **Прикладное значение:** Сочетание асферических, торических и прогрессивных профилей поверхности составляет основу современной индустрии медицинской оптики, обеспечивая наивысшее качество реабилитации пациентов с любыми аномалиями рефракции.