

Оптика.

Лекция 7.

**Реальные оптические системы.
Ограничения пучков**

Реальные (действительные) лучи

Через реальную оптическую систему в отличие от идеальной проходят реальные лучи, а не нулевые (параксиальные). Ход реального луча отличается от хода нулевого (идеального) луча. Отклонение хода реального луча от идеального связано со строгим выполнением законов преломления и отражения на реальных поверхностях оптических систем.

Отличия реальной оптической системы от идеальной:

В реальной оптической системе происходит ограничение пучков, то есть не все существующие лучи проходят через оптическую систему и достигают пространства изображений. Проходящие пучки лучей имеют конечные размеры.

Ход лучей, проходящих через оптическую систему, не совпадает с ходом идеальных лучей (реальные оптические системы обладают аберрациями).

Аберрации лучей (*лат. – отклонение*) – отклонение хода реального луча от идеального.

Расчет хода реальных лучей

Реальные лучи, в отличие от нулевых, преломляются не на главных плоскостях H и H' , а на реальных оптических поверхностях S и S' . Формулы расчета реального луча похожи на расчет нулевого луча и состоят из переноса и преломления:

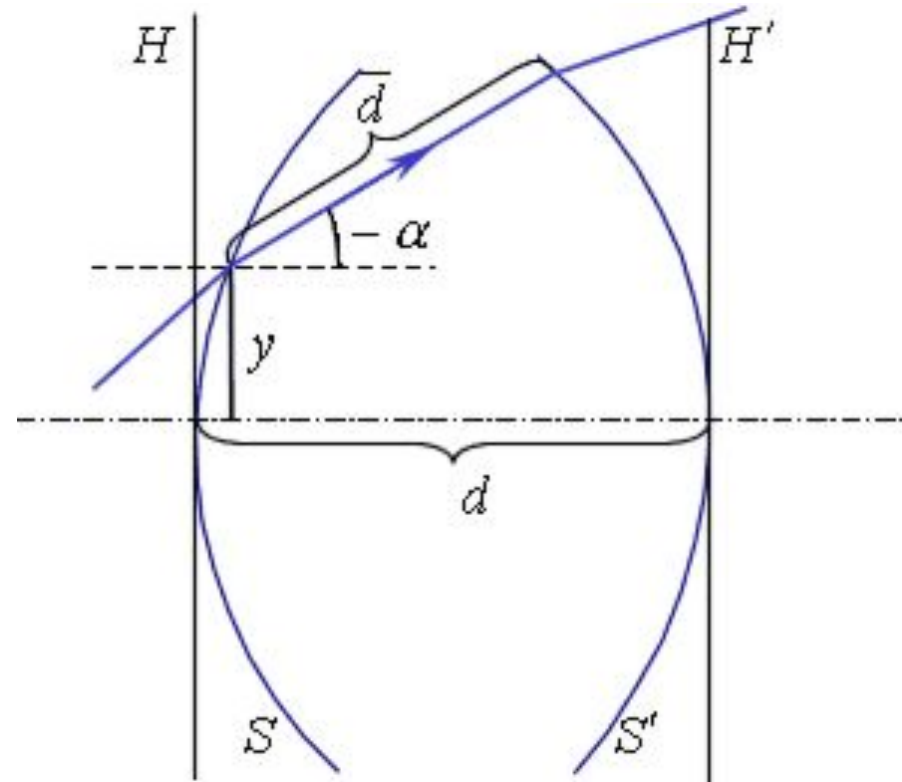
$$y = y + \frac{d}{n} Y$$

$$Y = Y - \bar{\Phi} y$$

Где d – расстояние вдоль луча между поверхностями (косая толщина), Φ – оптическая сила поверхности в точке преломления луча

$$\Phi = \rho(n' - n)$$

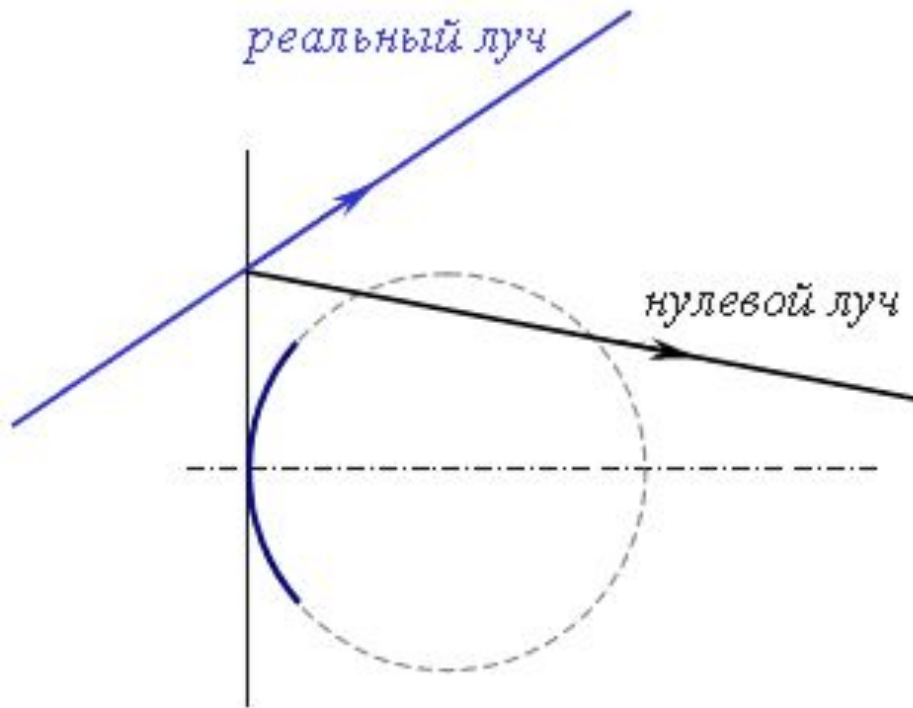
$$\Phi = \rho(n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon)$$



Причины «непрохождения» лучей через поверхность

В отличие от [параксиальных лучей](#), которые в любом случае попадают на [главную плоскость](#) поверхности, [реальные лучи](#) могут либо вообще не встретить поверхность, либо встретить ее в такой точке, которая не соответствует условиям физической или конструктивной реализуемости оптической системы.

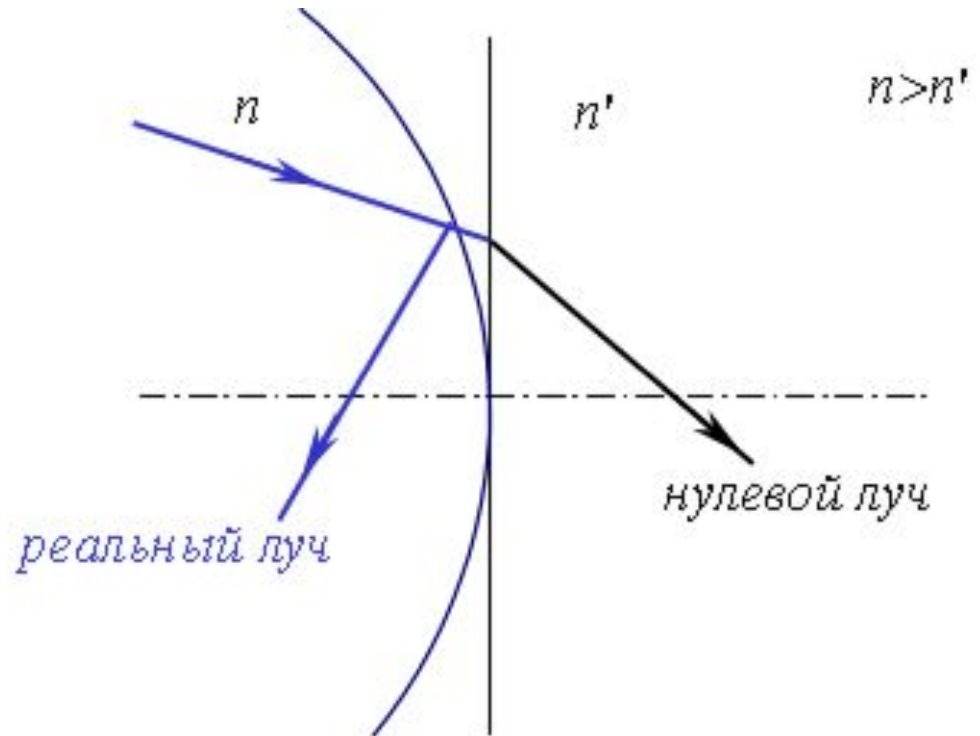
Луч не попадает на по



Нулевой луч преломляется на главной плоскости поверхности, а реальный луч идет слишком высоко и вообще не встречается с поверхностью. Дальнейший расчет такого луча невозможен (не соответствует условиям физической и математической реализуемости).

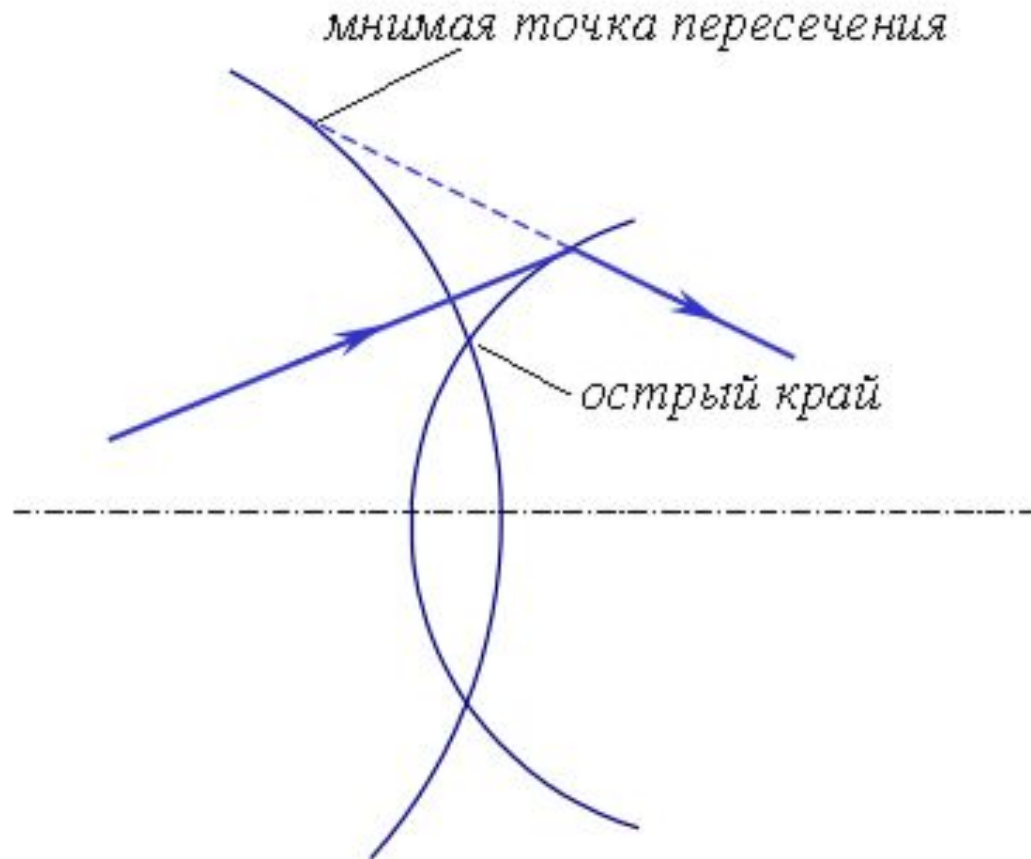
Полное внутреннее отражение

При падении луча на поверхность, за которой находится среда с показателем преломления меньшим, чем предыдущий, возможно [полное внутреннее отражение](#). Нулевой луч в этом случае все равно преломляется на главной плоскости и идет дальше, так как условия его преломления на поверхности не зависят от его координат, а реальный луч полностью отражается и его дальнейший расчет через оптическую систему невозможен.



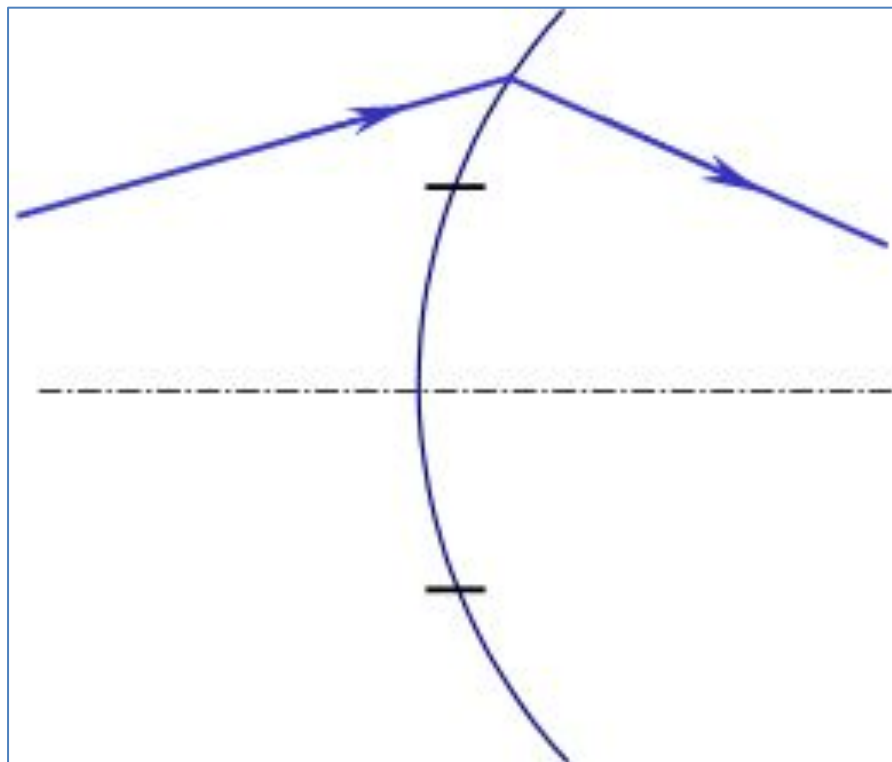
Луч проходит за острым краем

Вполне возможно, что луч оказывается выше точки пересечения поверхностей, это называется прохождением за острым краем. Точка пересечения луча с одной из поверхностей становится мнимой и возникает ситуация, когда математический расчет луча может быть продолжен, но такая система не может быть физически реализована.



Луч проходит за краем диафрагмы

Если по конструктивным соображениям габариты поверхностей специально ограничивают диафрагмами, то все лучи, которые не вписываются в заданные габариты, не рассчитываются через систему, хотя математически расчет вполне возможен.



Ограничения пучков лучей

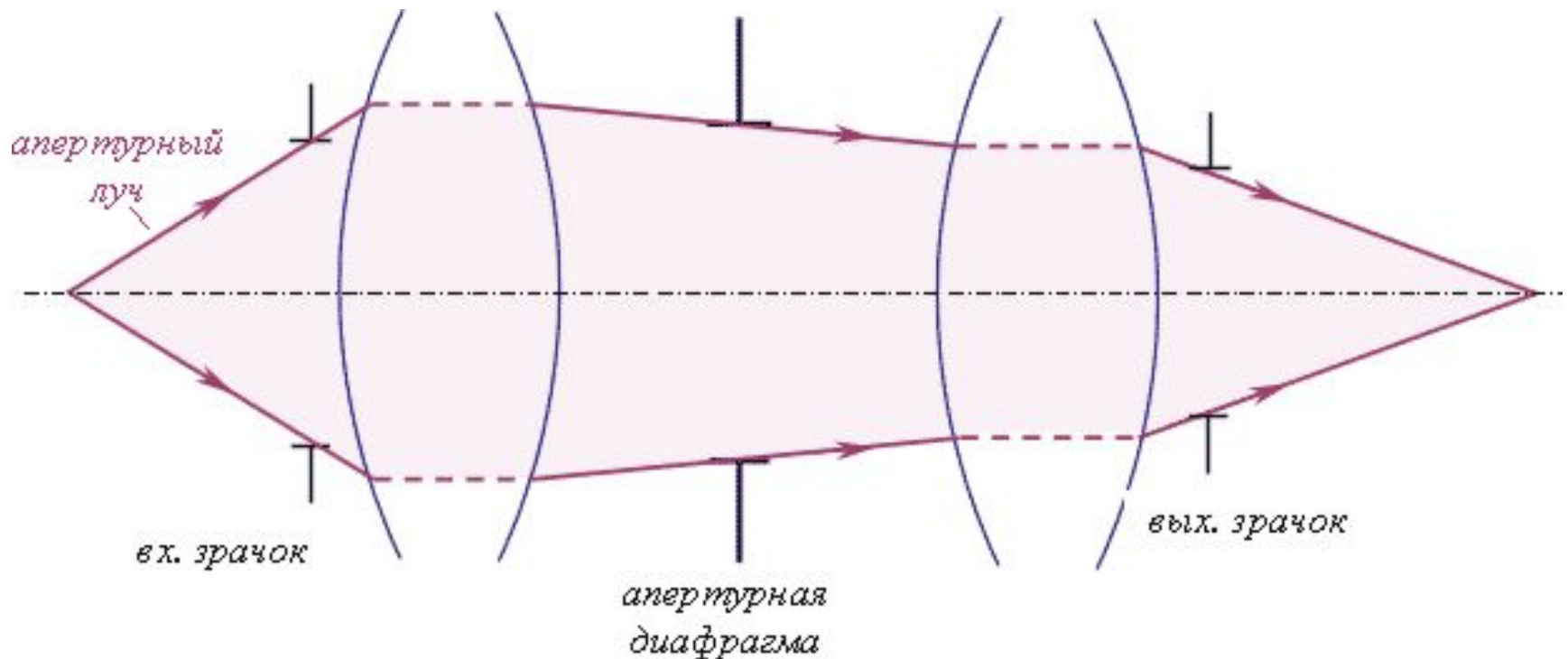
Ограничения пучков в оптических системах связаны с конечностью физических размеров оптических элементов. Эти ограничения обозначаются на схемах и чертежах в виде диафрагм, роль которых могут играть оправы линз, а также отдельно стоящие диафрагмы.

В принципе диафрагмы могут рассматриваться не только для реальных, но и для нулевых лучей (то есть в параксиальной области). Как правило, в первом приближении анализ габаритов пучков производится в параксиальной области, но впоследствии расчеты обязательно уточняют с использованием реальных лучей.

Апертурная диафрагма

Ограничение размера пучков – результат совместного действия всех имеющихся в оптической системе диафрагм. Однако можно выделить одну (наименьшую) диафрагму, и считать, что остальные не ограничивают ход лучей. Такая диафрагма называется апертурной.

Апертура (лат. – отверстие) – это понятие, которое в [геометрической оптике](#) определяет размер пучка лучей.



Апертурная диафрагма – это диафрагма, которая ограничивает размер осевого пучка (идущего из осевой точки предмета).

Луч, идущий из осевой точки предмета и проходящий через край апертурной диафрагмы называется **апертурным лучом**.

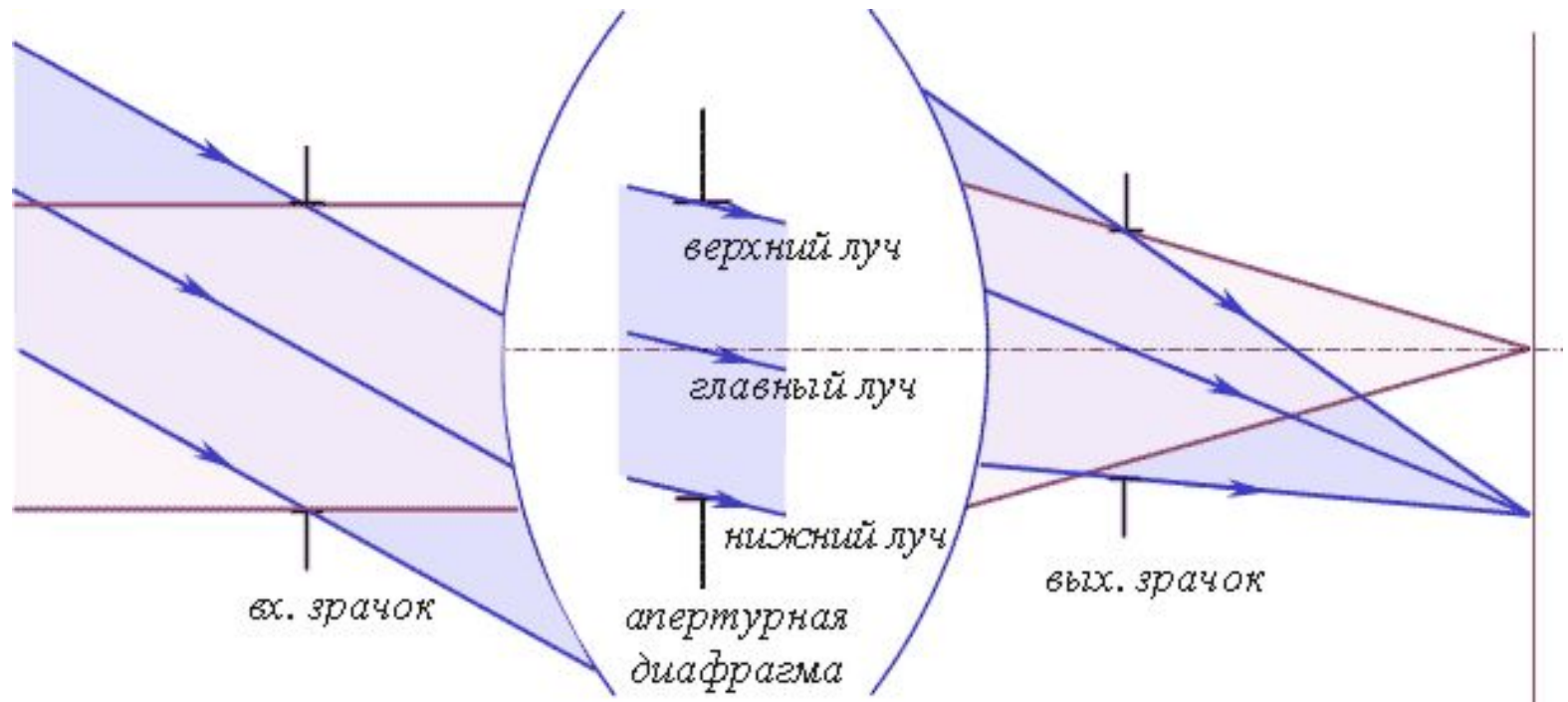
Параксиальное изображение апертурной диафрагмы в [пространстве предметов](#), сформированное предшествующей частью оптической системы в обратном ходе лучей, называется **входным зрачком оптической системы**. Если апертурная диафрагма находится в пространстве предметов, то входным зрачком является сама апертурная диафрагма.

Выходной зрачок – это параксиальное изображение апертурной диафрагмы в [пространстве изображений](#), сформированное последующей частью оптической системы в прямом ходе лучей.

Если апертурная диафрагма находится в пространстве изображений, то выходным зрачком является сама апертурная диафрагма.

Входной зрачок, выходной зрачок и апертурная диафрагма [сопряжены](#).

Апертурный луч внутри системы проходит через край апертурной диафрагмы, в пространстве предметов – через край входного зрачка, а в пространстве изображений – через край выходного зрачка.



Главный луч – это луч, идущий из внеосевой точки предмета и проходящий через центр апертурной диафрагмы.

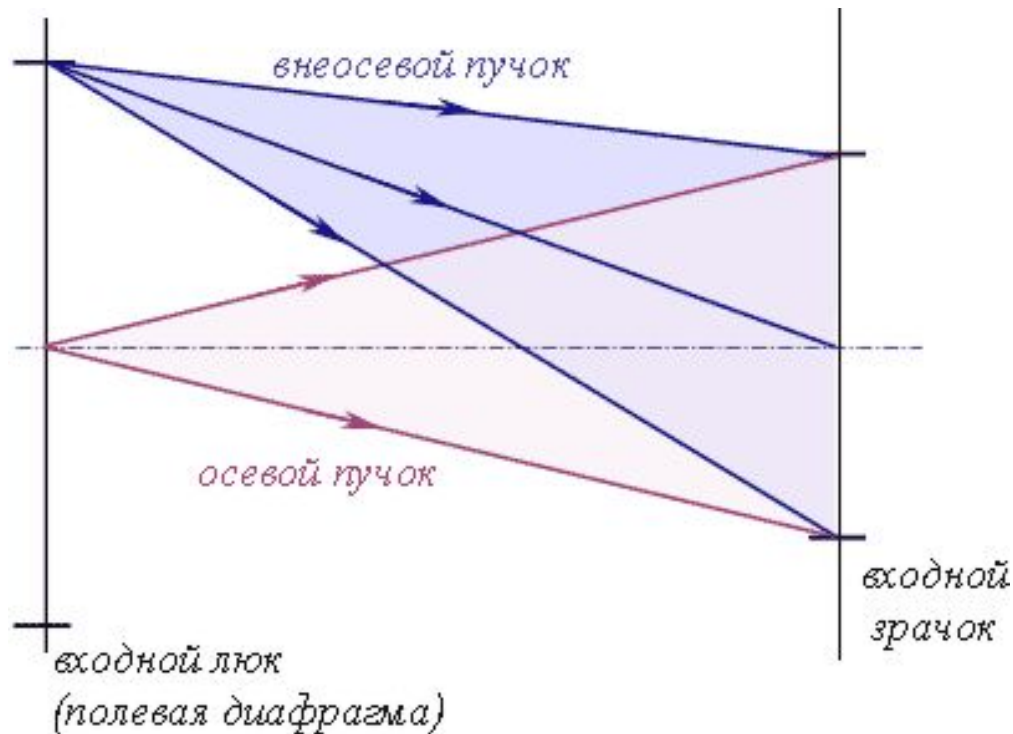
По законам [параксиальной оптики](#) главный луч также проходит через центр входного зрачка в пространстве предметов и через центр выходного зрачка в пространстве изображений.

Верхний луч внеосевого пучка – это луч, проходящий через верхний край апертурной диафрагмы и соответствующие ему сопряженные точки входного и выходного зрачков.

Нижний луч внеосевого пучка – это луч, проходящий через нижний край апертурной диафрагмы и соответствующие ему сопряженные точки входного и выходного зрачков.

Чтобы определить, какая из диафрагм оптической системы является апертурной,

Полевая диафрагма



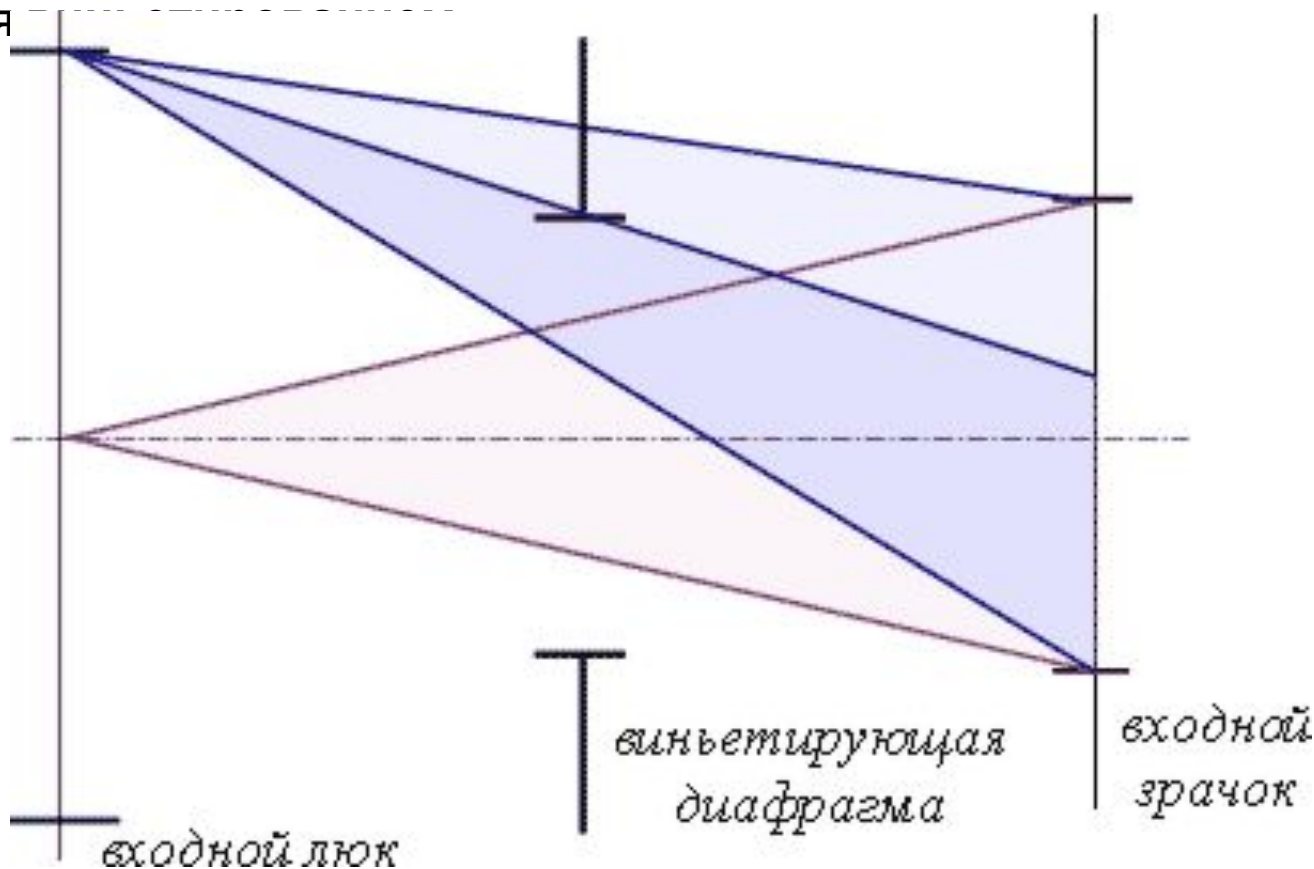
Поле – это часть плоскости предметов, которая изображается оптической системой. В параксиальной оптике размер поля неограничен. В реальной оптической системе поле ограничивается полевой диафрагмой.

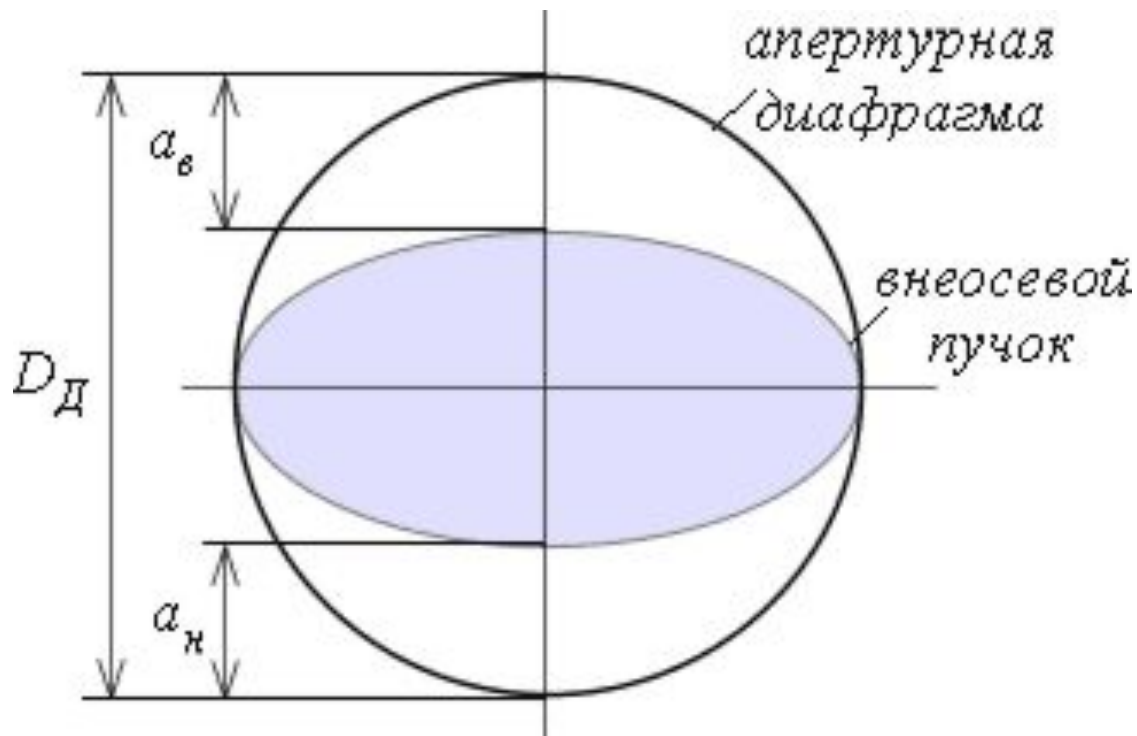
Полевая диафрагма – это диафрагма, ограничивающая размеры поля. Полевая диафрагма располагается либо на поверхности предмета, либо на поверхности изображения, либо в плоскости промежуточного изображения. Изображения полевой диафрагмы через соответствующие части оптической системы называются **входными и выходными люками (окнами)**.

Виньетирование

Если пучки лучей ограничиваются только апертурной диафрагмой, то они полностью заполняют зрачок.

Если внеосевые пучки дополнительно ограничиваются помимо апертурной другими диафрагмами, то зрачок заполняется не полностью. Это дополнительное ограничение или срезание пучков называется

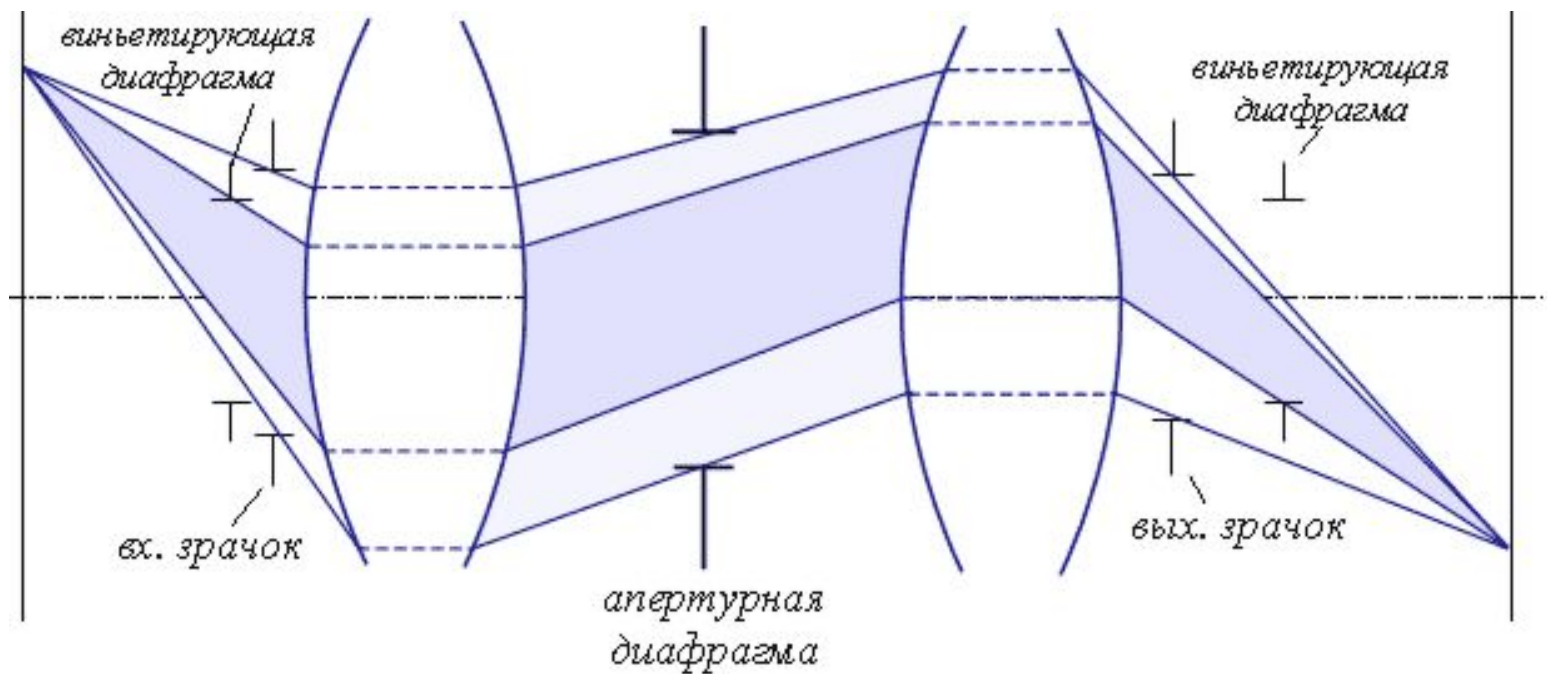




Коэффициент виньетирования – это отношение размеров срезаемой части диафрагмы к ее радиусу. Коэффициенты виньетирования сверху и снизу вычисляются следующим образом:

$$K_в = \frac{2a_в}{D_D}$$

$$K_н = \frac{2a_н}{D_D}$$



Достоинства виньетирования:

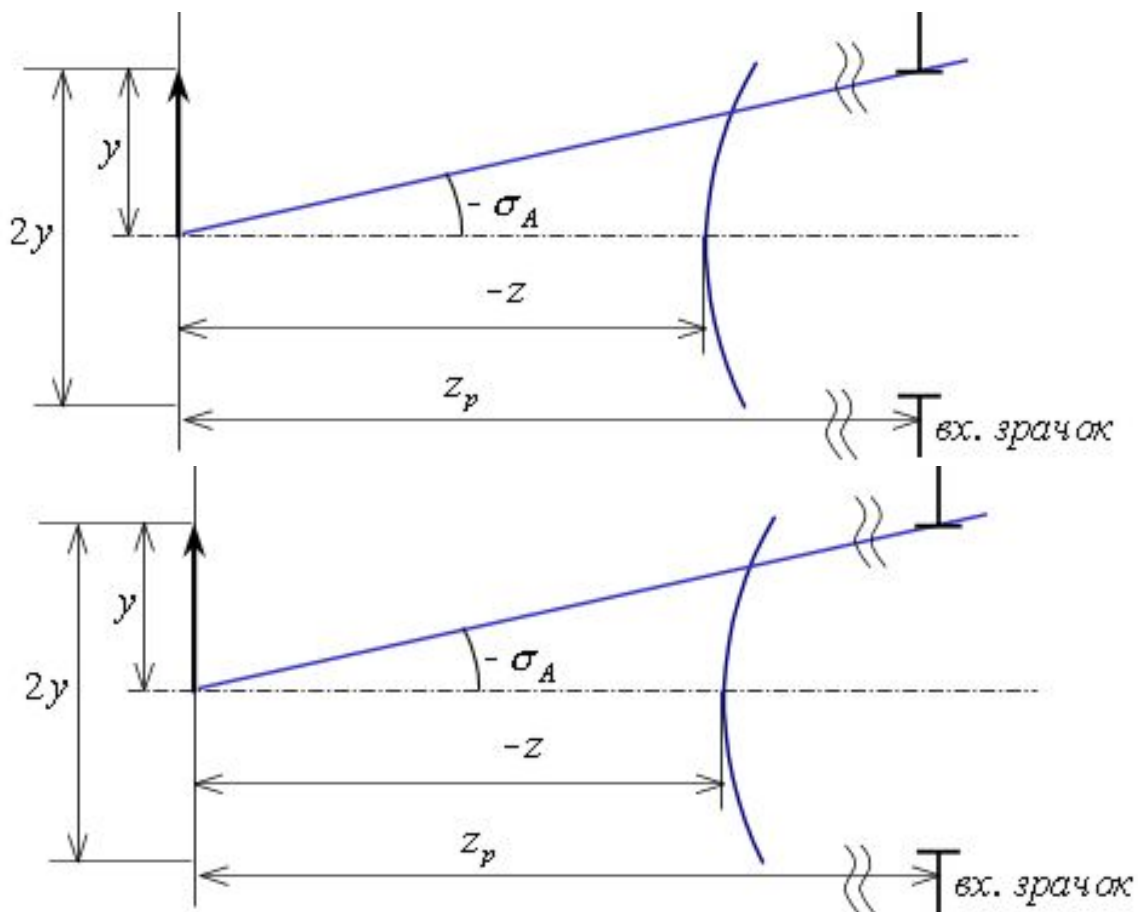
способствует уменьшению поперечных габаритов оптической системы, исключает из формирования изображения крайние зоны внеосевых пучков (именно они обычно имеют большие и трудно устранимые [абберации](#)).

Недостатки виньетирования:

уменьшает размеры пучков, следовательно, уменьшает энергию пучка, что приводит к неравномерному распределению [освещенности](#) внеосевых зон изображения,

в [дифракционно-ограниченных](#) оптических системах качество изображения определяется [дифракцией](#), причем чем меньше результирующая [апертура](#) (размер пучка), тем больше влияние дифракции, то есть ухудшается качество изображения.

Описание предметов, изображений и зрачков



Величину предмета (изображения) принято рассматривать как расстояние от оси до его крайней точки. Если предмет (или изображение) находятся достаточно близко к оптической системе, то его величина измеряется в линейной мере: y [мм], y' [мм]

Величина предмета – это половина всего поля, то есть размер всего поля .

Передний (задний) отрезок – это величина, определяющая положение предмета (изображения) по отношению к оптической системе. Передний отрезок для ближнего типа измеряется как расстояние от первой поверхности оптической системы до предмета, а задний отрезок измеряется как расстояние от последней поверхности до изображения: $S=z$ [мм], $S'=z'$ [мм].

Входной (выходной) зрачок может находиться на бесконечности. Поэтому размер зрачка определяется апертурным углом. **Апертурный угол** – это угол, образованный апертурным лучом и осью. Размеры зрачков определяют через синусы апертурных углов, умноженные на соответствующие показатели преломления – "оптические синусы". Эти размеры называется **числовыми апертурами**, и определяются следующим образом:

$$A_0 = n \cdot \sin \sigma_A$$

$$A'_0 = n' \cdot \sin \sigma'_A$$

Положение зрачка измеряется относительно предмета (изображения) в

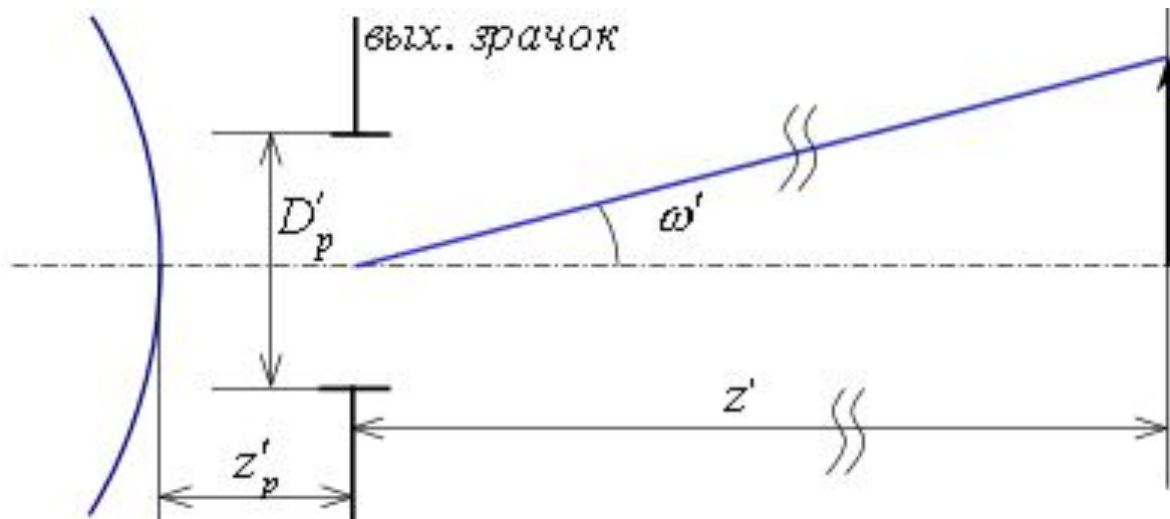
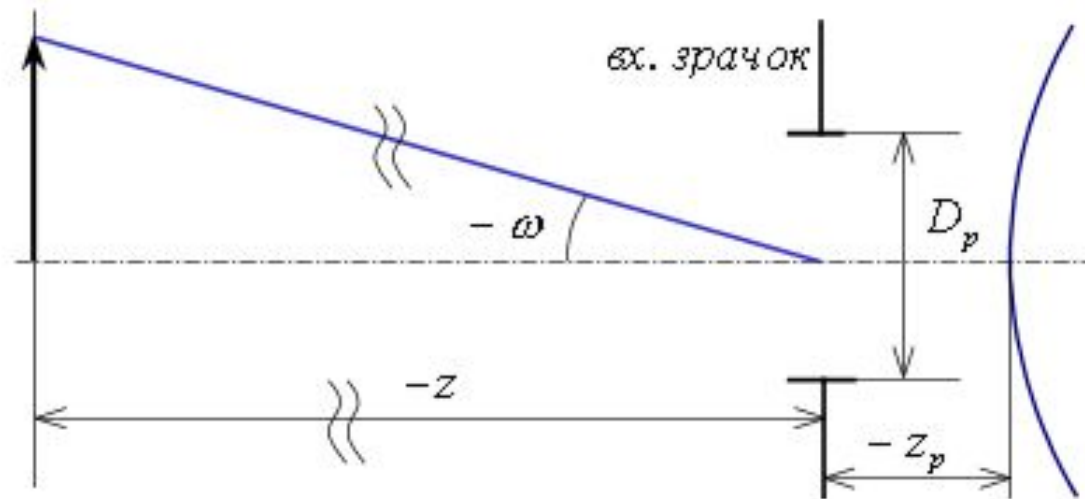
обратных миллиметрах. Если входной и выходной зрачки расположены строго в

бесконечности, то $S_p=0$ и $S'_p=0$. Такие положения зрачков обеспечиваются тем, что апертурная диафрагма находится в передней (или задней) фокальной плоскости первого (или последнего) компонента оптической системы. В этом случае возникает **телецентрический ход** главных лучей (главные лучи параллельны оптической оси).

$$S_p = \frac{1}{z_p}, [\text{кдптр}]$$

$$S'_p = \frac{1}{z'_p}, [\text{кдптр}]$$

Предмет (изображение) дальнего типа



Расчет параксиальных (нулевых) лучей через оптическую систему

Если предмет (или изображение) находится достаточно далеко от оптической системы, то мы можем оценить только его угловые размеры. Точка, из которой измеряются угловые размеры предмета (изображения), называется **полюсом**. Будем считать, что полюс находится в центре входного зрачка для предмета, и в центре выходного зрачка для изображения.

Величина предмета (изображения) дальнего типа – это угол, под которым видна крайняя точка предмета (изображения) из центра входного (выходного) зрачка:

ω [Гр.мин.сек], ω' [Гр.мин.сек].

Величина всего поля 2ω . Мерой угловой величины являются градусы/минуты/секунды (гр.мн.сек.),

Положение предмета (изображения) измеряется в обратных миллиметрах относительно входного (выходного) зрачка:

$$S = \frac{1}{z_p}, [\text{кднтр}]$$

$$S' = \frac{1}{z'}, [\text{кднтр}]$$

В случае предмета (изображения) дальнего типа зрачок находится близко к оптической системе, поэтому величина зрачка измеряется как его линейный размер. Таким образом, **апертуры** в этом случае определяются следующими выражениями:

$$A_0 = n \cdot \frac{D_p}{2}, [\text{мм}]$$

$$A'_0 = n' \cdot \frac{D'_p}{2}, [\text{мм}]$$

Положение зрачка измеряется в миллиметрах от оптической системы:

$$S_p = z_p, [\text{мм}]$$

$$S'_p = z'_p, [\text{мм}]$$

Для оптической системы очень важно знать положение выходного зрачка. Так как изображение обычно воспринимается или последующей оптической системой, или глазом, следовательно, необходимо, чтобы выходной зрачок оптической системы совпадал с входным зрачком прибора или глаза по положению и размерам.

Обобщенные характеристики

Обобщенные характеристики	Ближний тип	Дальний тип
Величина предмета (изображения)	$\bar{y} = y, [\text{мм}]$ $\bar{y}' = y', [\text{мм}]$	$\bar{y} = tg \omega, [\text{гр.мн.сек.}]$ $\bar{y}' = tg \omega', [\text{гр.мн.сек.}]$
Положение предмета (изображения)	$\bar{S} = S = z, [\text{мм}]$ $\bar{S}' = S' = z', [\text{мм}]$ (измеряется от поверхности)	$\bar{S} = S = \frac{1}{z}, [\text{кднтр}]$ $\bar{S}' = S' = \frac{1}{z'}, [\text{кднтр}]$ (измеряется от зрачка)
Входная (выходная) апертуры	$\bar{A}_0 = A_0 = n \cdot \sin \sigma_A$ $\bar{A}'_0 = A'_0 = n' \cdot \sin' \sigma'_A$ (числовая апертура)	$\bar{A}_0 = A_0 = n \frac{D_p}{2}, [\text{мм}]$ $\bar{A}'_0 = A'_0 = n' \frac{D'_p}{2}, [\text{мм}]$ (апертура)
Положение входного (выходного) зрачка	$\bar{S}_p = S_p = \frac{1}{z_p}, [\text{кднтр}]$ $\bar{S}'_p = S'_p = \frac{1}{z'_p}, [\text{кднтр}]$ (измеряется от предмета/изображения)	$\bar{S}_p = S_p = z_p, [\text{мм}]$ $\bar{S}'_p = S'_p = z'_p, [\text{мм}]$ (измеряется от поверхности)