

Преимущества и
недостатки использования
оптических волокон в
системах связи.

ОК обладают рядом преимуществ и недостатков по сравнению с обычными медными кабелями

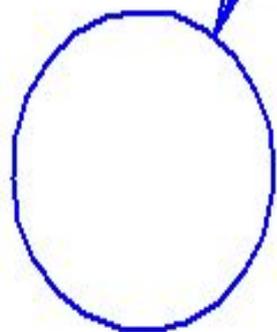
Преимущества ОК.

1. Широкая полоса пропускания—обусловлена чрезвычайно высокой частотой несущей - около 10^{15} Гц, которая обеспечивает потенциальную возможность передачи по одному ОВ потока информации в несколько терабит в секунду

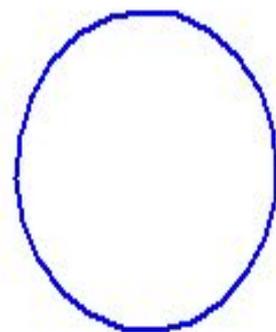
$$f = 10^{14} - 10^{15} \text{ Гц}$$

2. Малое затухание оптического сигнала в волокне α (0,2- 0,3 дБ/км на $\lambda=1,55$ мкм) и большие длины регенерационных участков.
3. Высокая помехозащищенность к внешним полям и практическое отсутствие переходных помех между отдельными волокнами. Поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала, то оно не восприимчиво к эл\маг помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования, способного индуцировать эл\маг излучение.

помеха

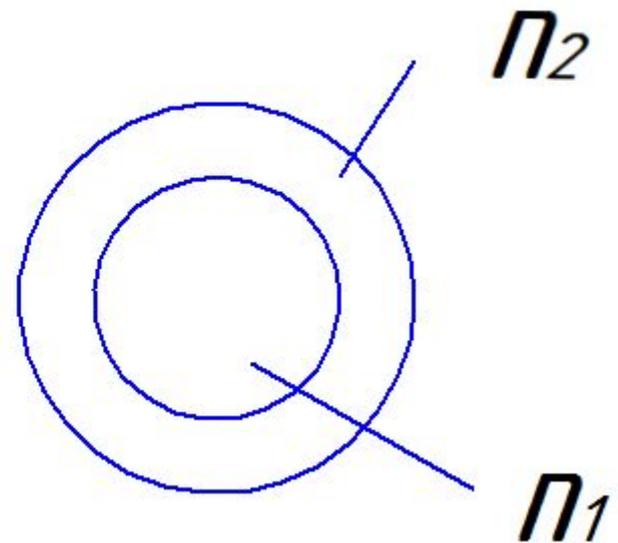
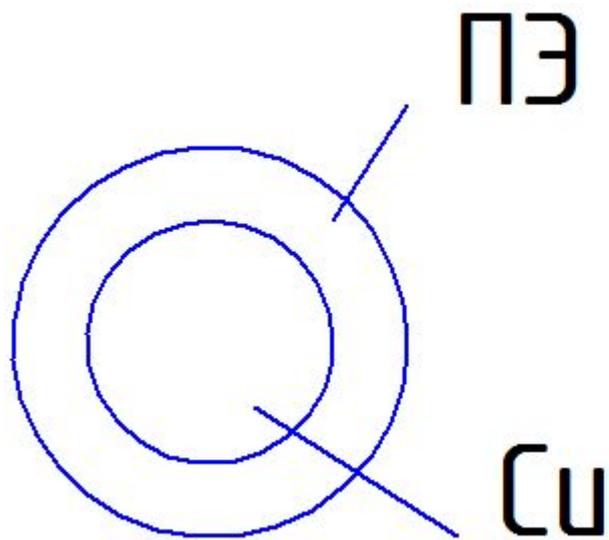


ЭК



OK

4. Экономичность. Волокно изготавливается из кварца, основу которого составляет двуокись кремния SiO_2 , широко распространенная в природе и являющаяся, в отличие от меди и свинца, недорогим материалом. В настоящее время стоимость ОВ и медной пары соотносится как 2:5.



5. Малый вес и объем. ЗОК имеют меньший вес и объем по сравнению с медными кабелями в расчете на одну и ту же пропускную способность.
6. Низкий уровень шумов в ВОК позволяет увеличить полосу пропускания за счет использования различных способов модуляции сигналов при малой избыточности их кодирования.
7. Высокая защищенность от несанкционированного доступа—поскольку ВОК практически не излучают в радиодиапазоне, то передаваемую по нему информацию трудно подслушать, не нарушая приема-передачи.

8. Взрыво-пожаробезопасность. Из-за отсутствия искрообразования. ОВ повышает безопасность сетей связи на химических, нефтеперерабатывающих предприятиях и т. д.
9. Длительный срок эксплуатации—для ВОК- 25 лет.
10. Большая строительная длина.
 $l_{\text{стр}} = 2200 \text{ м (ОК)}$
Сейчас есть и 5 км, и 7 км
 $l_{\text{стр}} \approx 1 \text{ км (СК)}$
 $l_{\text{стр}} \approx 500 \text{ м (КК)}$
11. Потенциально низкая стоимость одного канала-км.
12. Возможность подачи электропитания—оснащение ОК медными проводниками для подачи электропитания (или ДП) на узел информационной волоконно-оптической сети,

Недостатки ОК.

1. ОК достаточно дорогой из-за сложной технологии изготовления.
2. Стекло подвержено радиации, оно мутнеет, вследствие чего растет затухание α , но через некоторое время прозрачность восстанавливается.
3. Дороговизна прецизионного монтажного оборудования.
4. Относительно высокая стоимость лазерных источников излучения.
5. Требования специальной защиты волокна.

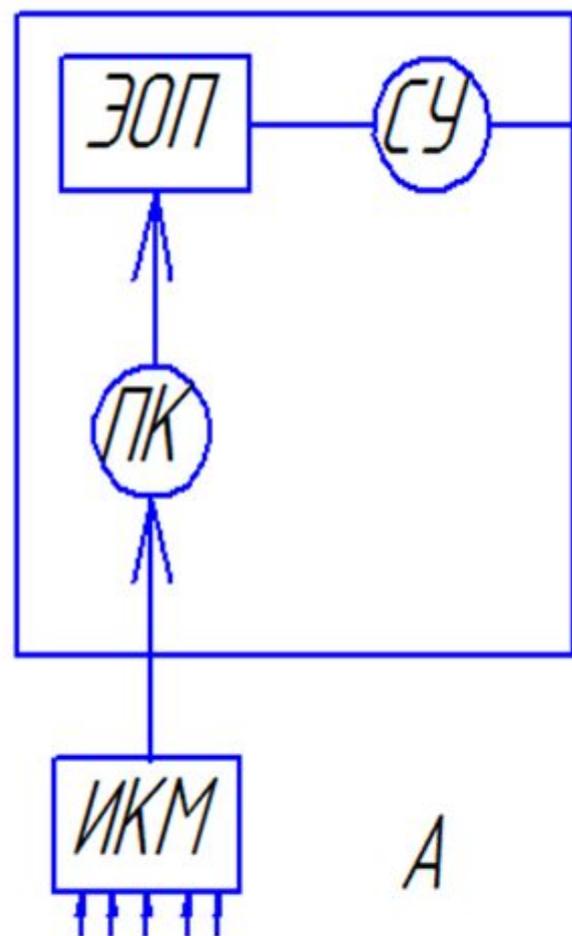
Построение оптических систем передачи.

ВОСП—это совокупность оптических устройств и оптических линий передачи для создания, обработки и передачи оптических сигналов. При этом оптическим сигналом служит модулированное оптическое излучение лазера или светодиода.

Во всех случаях оптической передачи электрический сигнал, создаваемый частотным или временным способом, модулирует оптическую несущую и световой сигнал передается по оптическому кабелю. Используется способ модуляции интенсивности оптической несущей.

Структурная схема ВОСП

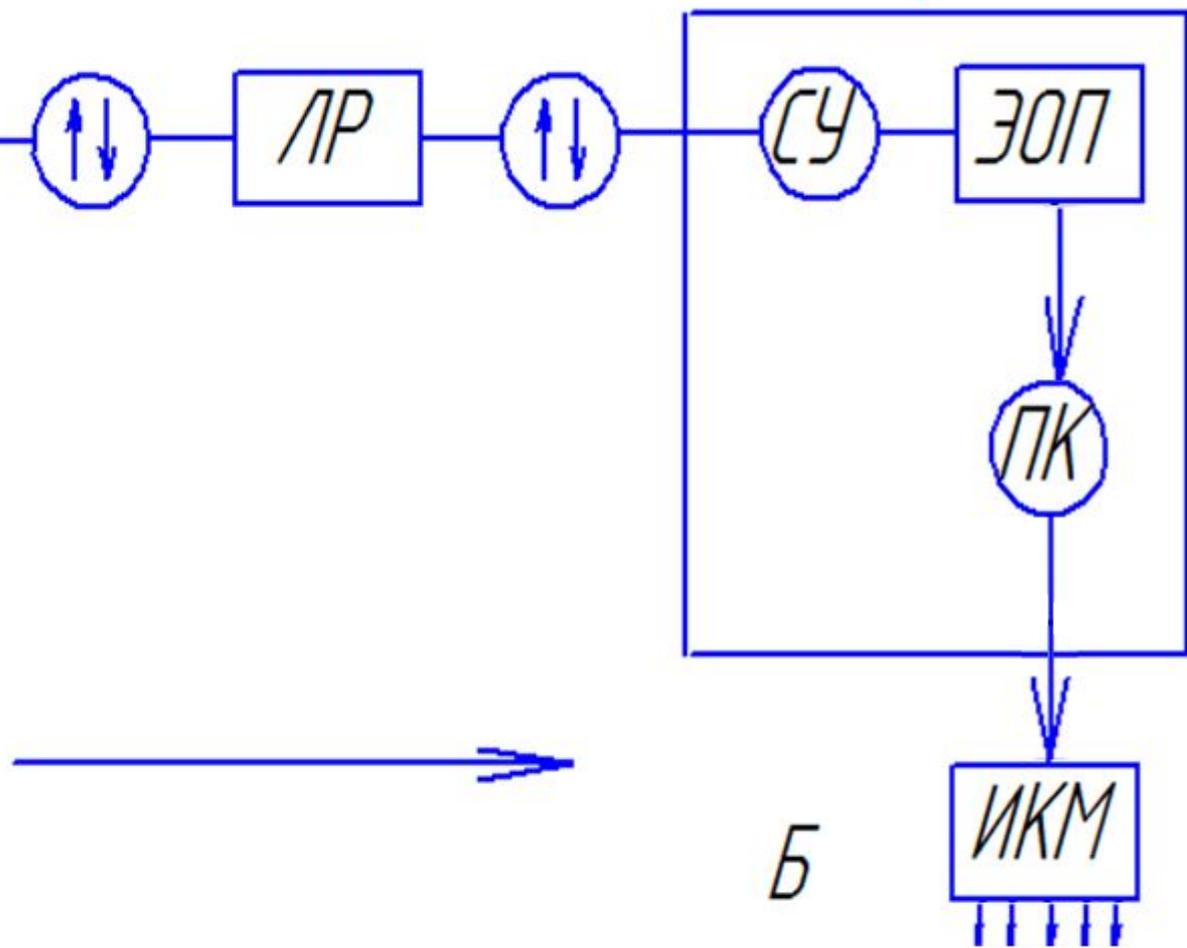
Оптический передатчик



A

*аналоговый или цифровой
сигнал на входе*

Оптический приемник



Б

*аналоговый или цифровой
сигнал на выходе*

ПК—преобразователь кода.

ЭОП—электронно-оптический преобразователь.

СУ—согласующее устройство.

ЛР—линейный регенератор.

Передатчик—преобразует электрические сигналы в световые. Данное преобразование выполняет источник, представляющий собой либо СИД, либо лазерный диод.

Приемник—предназначен для приема светового сигнала и его обратного преобразования в электрические сигналы (фотодетектор).

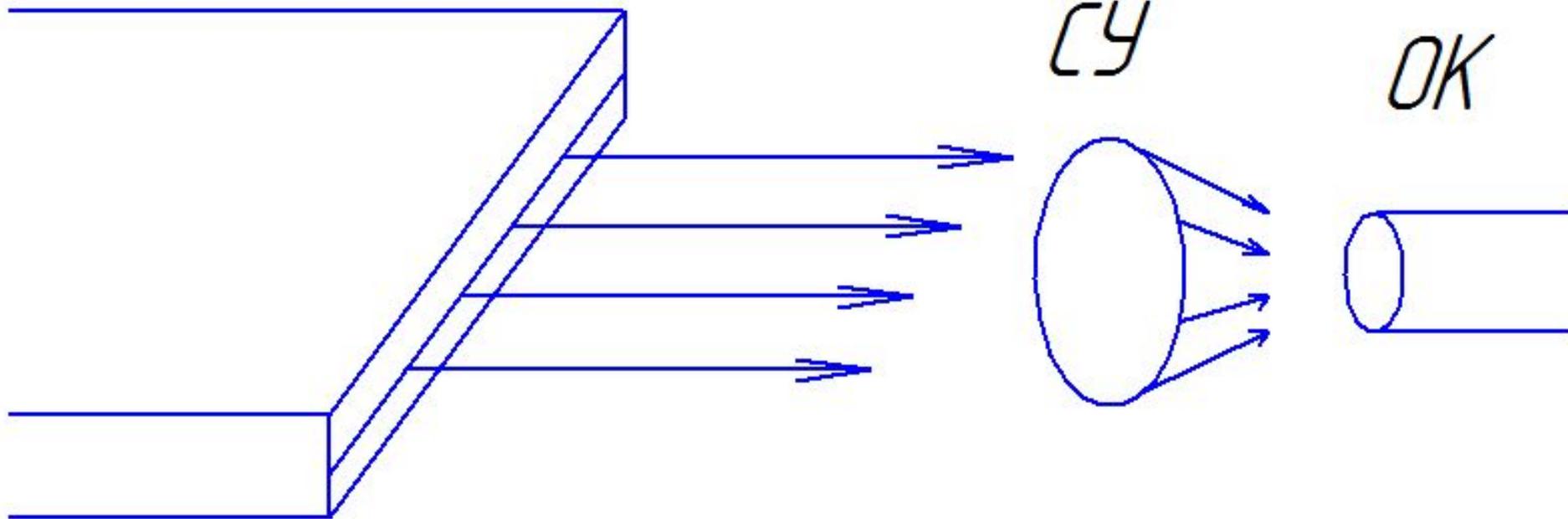
Необходимость ПК вызвана тем, что стандартная СП ИКМ использует код с импульсами положительной, отрицательной полярности и паузы, а в качестве линейного сигнала ВОЛС используется однополярный сигнал, который содержит только положительные импульсы и паузы.

Передающие и приемные СУ формируют и согласовывают диаграмму направленности источника излучения и апертурный угол ОК.

ЛД (ППЛ)

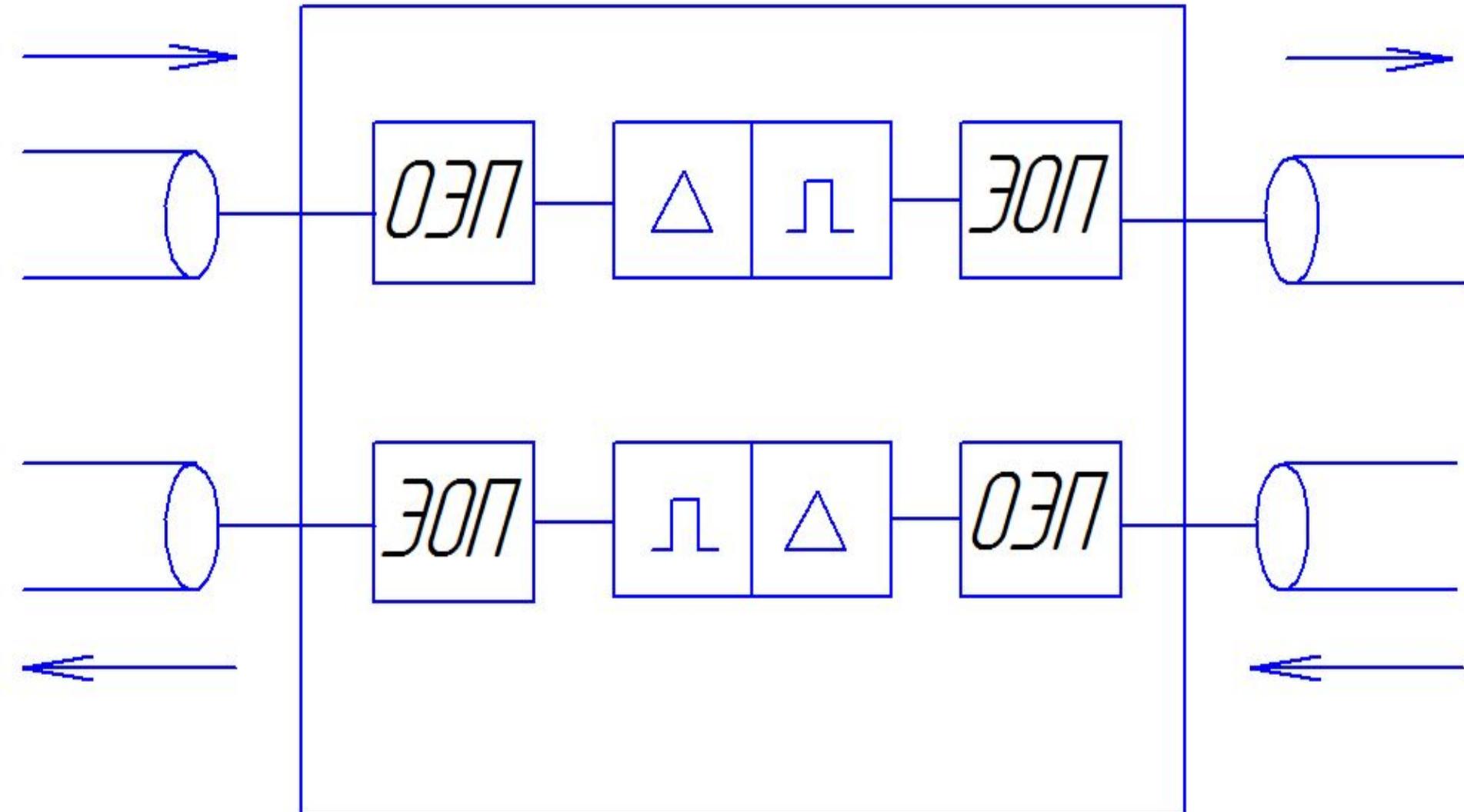
СУ

ОК

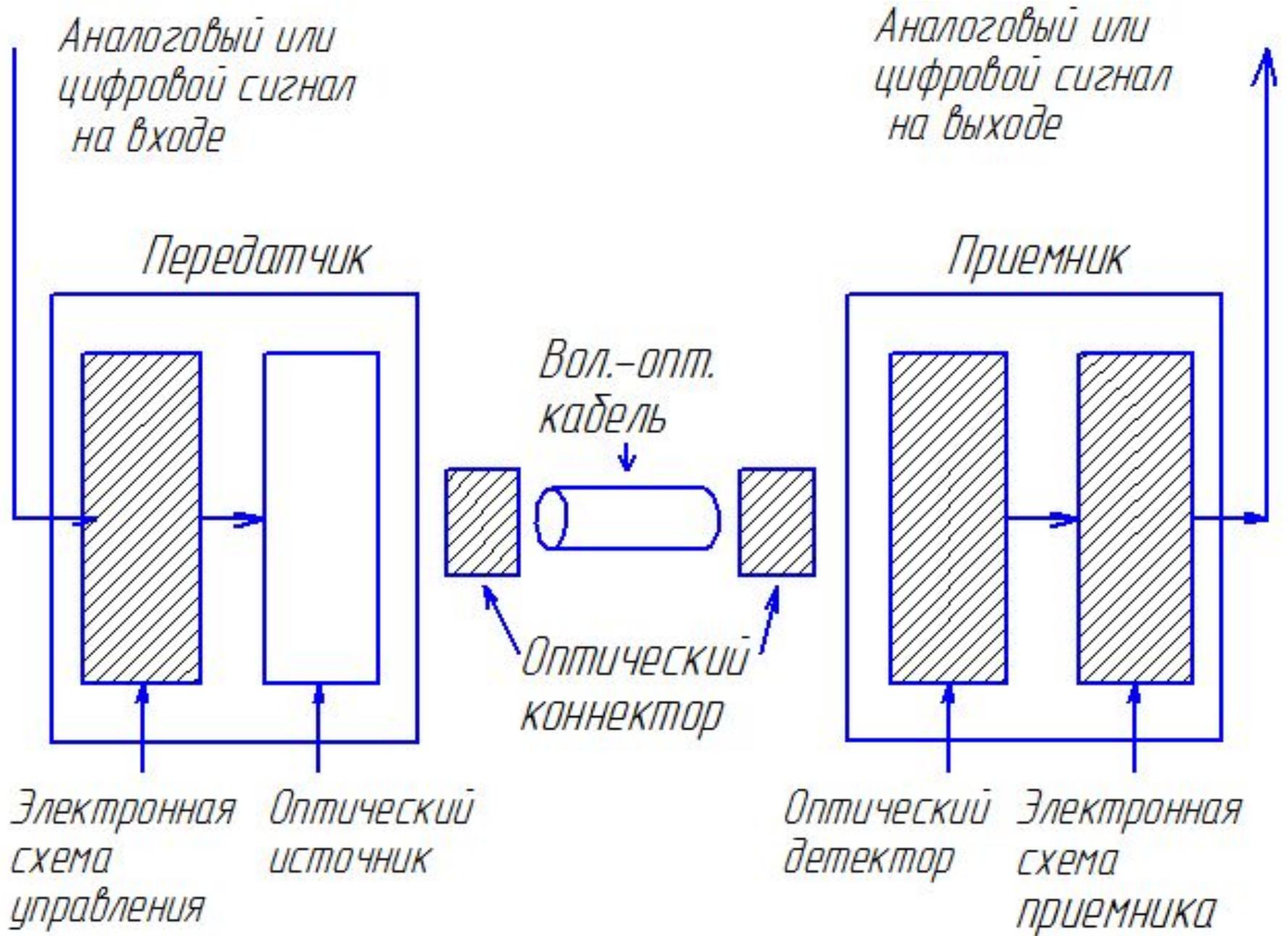


ЛР: восстанавливает форму импульса и амплитуду

Структурная схема регенератора

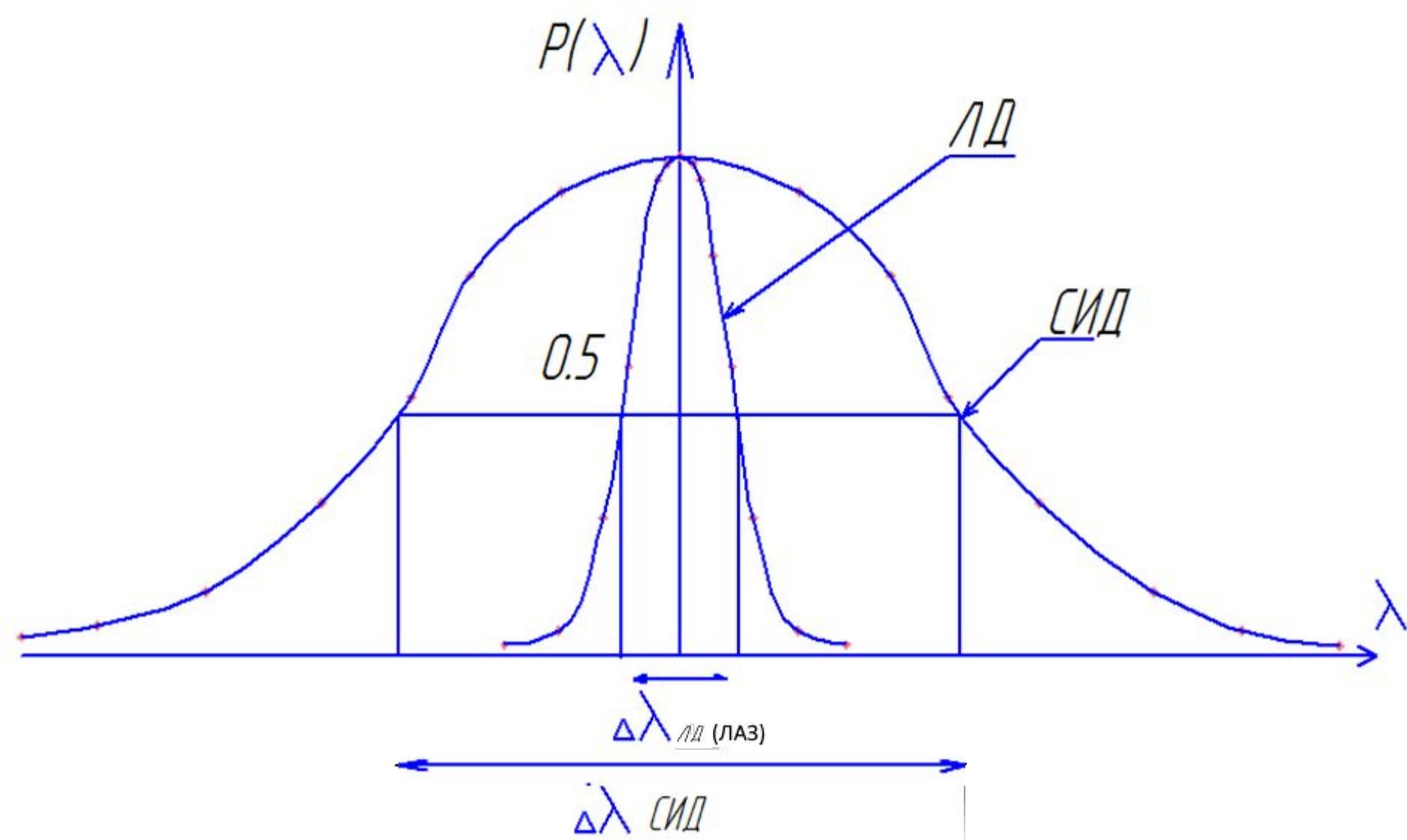


Структурная схема ВОСП.



Передатчик—преобразует электрические сигналы в световые. Данное преобразование выполняет источник, представляющий собой либо светоизлучающий диод (СИД), либо лазерный диод. Источник оптических сигналов управляет либо аналоговым, либо цифровым сигналом.

Применение СИД в основном на городских и корпоративных сетях (на небольшие расстояния). Лазеры—внутризоновых и магистральных ВОЛП. Это объясняется тем, что они имеют разные спектральные характеристики излучения.



- $\Delta\lambda_{\text{лаз}} < 1 \text{ нм}$
- $\Delta\lambda_{\text{СИД}} = (20 \div 40) \text{ нм}$

Волоконно-оптический кабель—среда, по которой распространяется световой сигнал. Кабель состоит из оптических волокон (от 8 и более), каждое из которых защищено специальным покрытием и защитных оболочек или бронепокровов.

Приемник—предназначен для приема светового сигнала и его обратного преобразования в электрические сигналы. Его основными частями являются: оптический детектор, непосредственно выполняющий функцию преобразования сигнала; фотодетектор, который может быть построен на базе лавинных фотодиодов или p-i-n фотодиодов. Последние отличаются малым уровнем шумов.

Соединители (коннекторы) предназначены для подключения волокна к источнику, оптическому детектору и для соединения волокон между собой.

Физические процессы в направляющих системах.

Передача по НС однопроводной и диэлектрической конструкций возможна лишь в диапазоне СВЧ, когда:

1. Длина волны меньше, чем поперечные размеры—диаметр НС, т.е. $\lambda < D$.
2. Действуют весьма сильные токи смещения ($I_{см}$), превалирующие над током проводимости ($I_{пр}$), т.е. $I_{см} > I_{пр}$.

При $\lambda < D$ эл\маг волна распространяется зигзагообразно, многократно отражаясь от границы раздела сред с различными

На рисунке показан путь движения эл\маг волн, например, по волновому. Волна образует с поперечным сечением волновода угол θ и многократно отражается от стенок волноводов под углом 2θ . Величины λ , D и θ связаны следующим соотношением: $\cos\theta = \lambda/D$

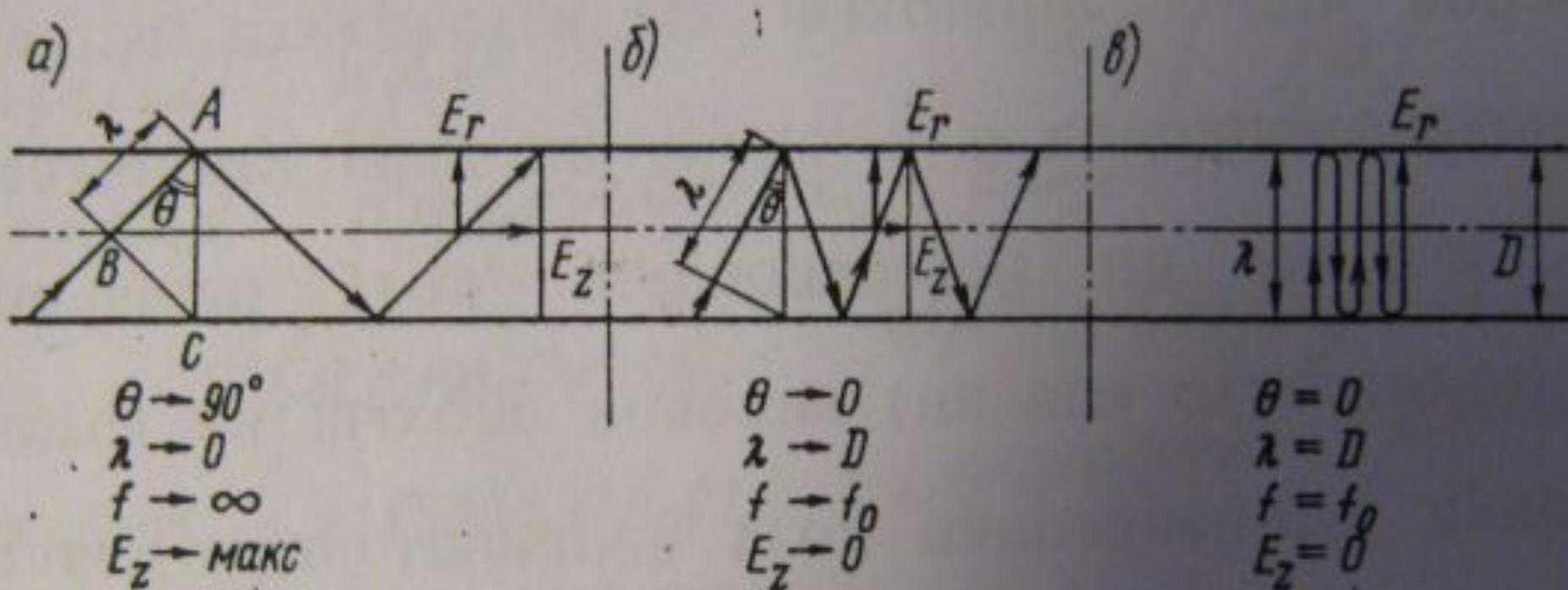


Рис. 3.5. Зигзагообразное распространение электромагнитной волны в волноводе для частот:
 а) очень высоких; б) менее высоких; в) критической

Из рисунка видно, что по волноводу могут распространяться лишь волны, длина которых меньше диаметра волновода (световода). Также здесь показаны предельные случаи распространения малых волн ($\lambda \rightarrow 0$) (рис. а) и волн, соизмеримых с диаметром волновода ($\lambda \rightarrow D$).

При $\lambda \rightarrow 0$ и $f \rightarrow \infty$ угол $\theta \rightarrow 90^\circ$, отражений мало и волна стремится к прямолинейному движению вдоль волновода. В этом случае продольная составляющая E_z (или H_z) имеет максимальное значение и передача по волноводу происходит в выгодных условиях. При $\lambda \rightarrow D$ и $f \rightarrow c/D$ угол $\theta \rightarrow 0$, волна испытывает большое число отражений и поступательное движение ее весьма мало. В этом случае продольная составляющая поля E_z (или H_z) стремится к нулю и вдоль волновода передается незначительная доля энергии (рис. б).

На определенной сравнительно низкой частоте наступает такой режим, когда $\theta=0$, волна падает на стенку и отражается перпендикулярно (рис. в). В волноводе устанавливается режим стоячей волны, и энергия вдоль не перемещается. Это соответствует случаю критической длины волны $\lambda_0=D$ и критической частоты $f_0 = C/\lambda_0 = C/D$. Это видно из $\triangle ABC$, где $\cos\theta = \lambda/D$. С уменьшением угла θ от 90° до 0° длина волны λ уменьшается от D до 0 . Причем при $\theta=0$ $\cos(\lambda/D) = 1$ тогда $\lambda_0 = D$ и критическая частота соответственно равна $f_0 = C/D$. Частота f_0 определяет нижний предел частот, которые могут распространяться по данному волноводу.

При передаче СВЧ (когда $\lambda < D$) не требуется двух проводных систем и передача происходит за счет многократных зигзагообразных отражений волны от любой границы раздела сред с различными электрическими свойствами.

Для передачи волн длиной $\lambda > D$ необходимо иметь два проводника—прямой и обратный, т.е. передача происходит по двухпроводной схеме.

В различных НС для разных диапазонов частот преобладают $I_{\text{пр}}$ или $I_{\text{см}}$. В области невысоких частот, когда $\lambda > D$, передача происходит за счет $I_{\text{пр}}$. При СВЧ, когда $\lambda < D$, доминируют токи смещения, которые могут распространяться в воздухе, диэлектрике и им не нужна проводящая среда.

- В СК и КК, которые используются при $\lambda > D$, в прямом и обратном проводниках циркулируют токи проводимости ($I_{\text{пр}} + I_{\text{пр}}$).
- В волноводах ($\lambda < D$) действуют суммарно токи смещения внутри волновода и токи проводимости в его стенках ($I_{\text{см}} + I_{\text{пр}}$).
- В световодах ($\lambda \ll D$) в прямом и обратном направлениях протекают токи смещения ($I_{\text{см}} + I_{\text{см}}$).
- При распространении волн в атмосфере действуют по замкнутым путям токи смещения $I_{\text{см}}$.

Отражение и преломление света.

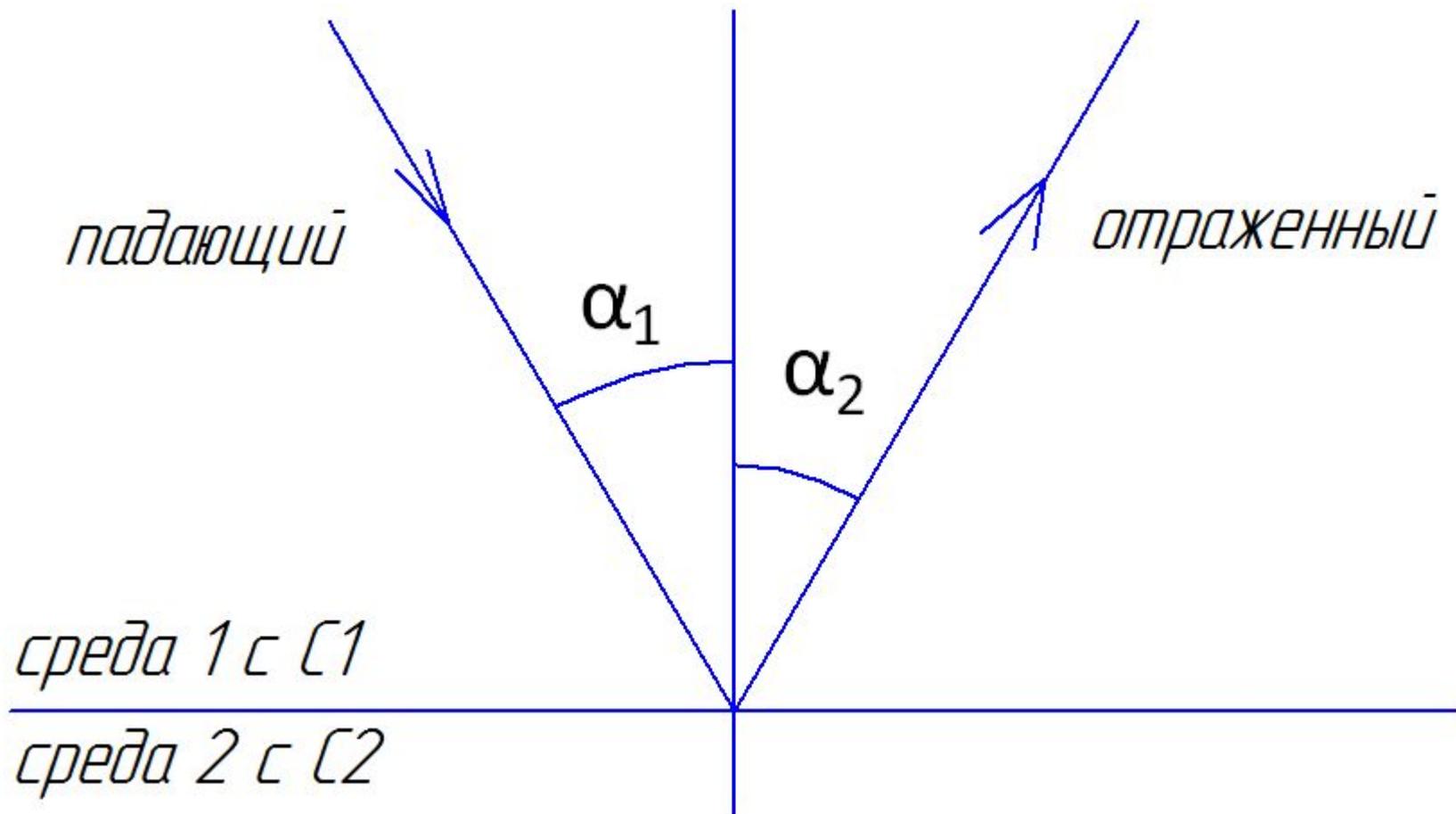
Когда свет падает на границу раздела двух сред, определенная его часть отражается. Количество отраженного света зависит от угла α_1 между падающим лучом света и нормалью к поверхности падения.

Термин «луч света» здесь используется для обозначения пути, по которому проходит световая энергия.

Отраженный луч:

- Остается в плоскости падения, образуемой падающим лучом света и нормалью к поверхности падения луча.
- По отношению к падающему лучу света лежит на противоположной стороне от нормали к поверхности падения.

Угол падения равен углу отражения.

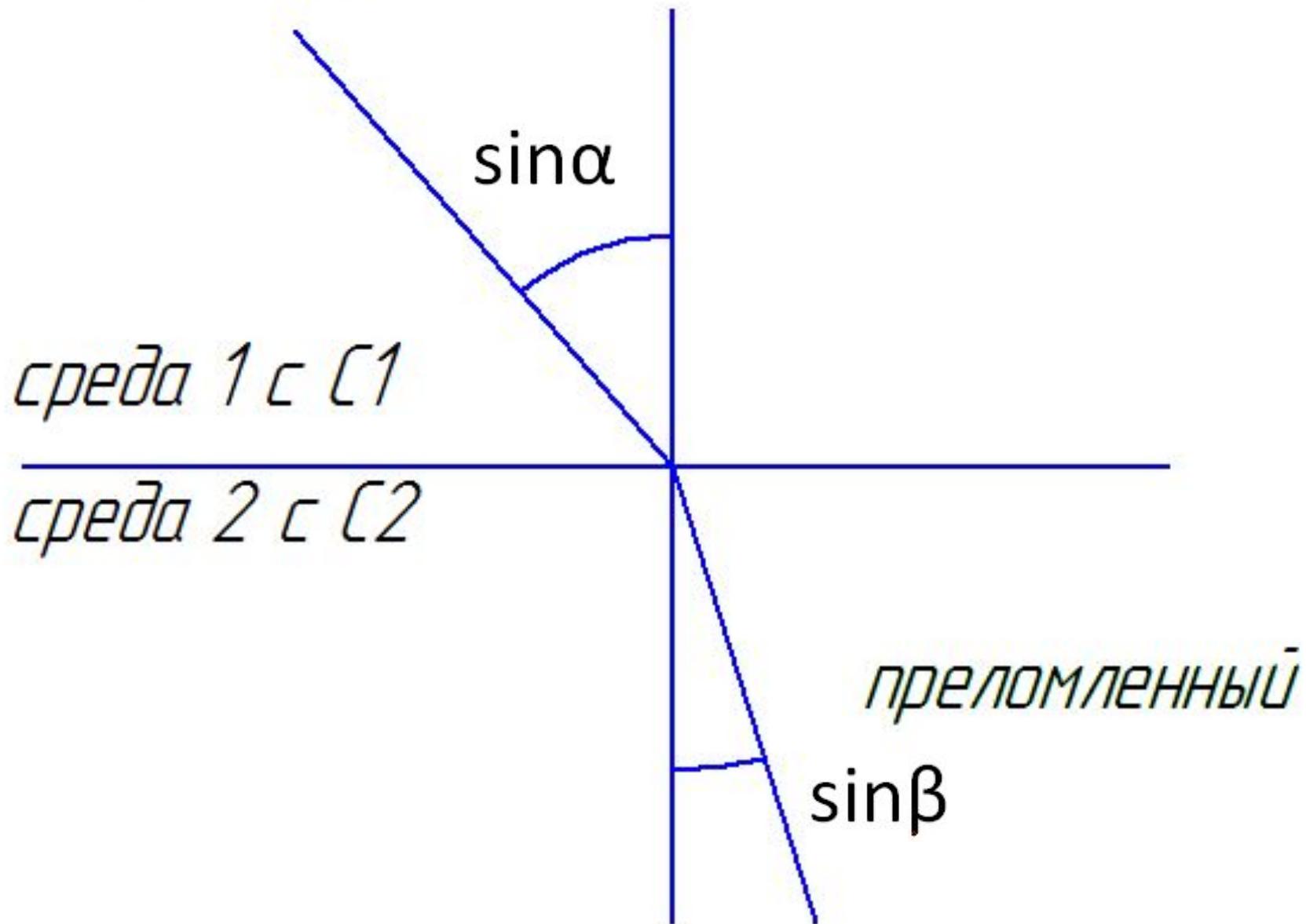


Когда луч входит под углом падения α в оптически более плотную среду (стекло, воду) из оптически менее плотной среды (воздуха), то его направление распространения по отношению к нормали к поверхности падения изменяется, он преломляется под углом преломления β .

Для изотропной среды, т.е. материала или вещества, имеющего одинаковые свойства во всех направлениях, применим закон преломления Снеллиуса: отношение \sin угла падения к \sin угла преломления есть величина постоянная и также идентично отношению C_1/C_2 скоростей света C_1 в первой среде и C_2 во второй среде:

$$\sin\alpha/\sin\beta=C_1/C_2$$

падающий



При переходе из вакуума (воздуха), где свет распространяется со скоростью C_0 , в среду со скоростью света C имеет силу отношение:

$$\sin\alpha/\sin\beta=C_0/C=n$$

n —показатель преломления $n=$

ε —диэлектрическая проницаемость среды.

μ —магнитная проницаемость среды.

Для оптики $\mu=1$. $n=1$ —для воздуха.

Для двух различных сред с показателями преломления n_1 и n_2 , и скоростями света в них C_1 и C_2 имеют силу следующие отношения:

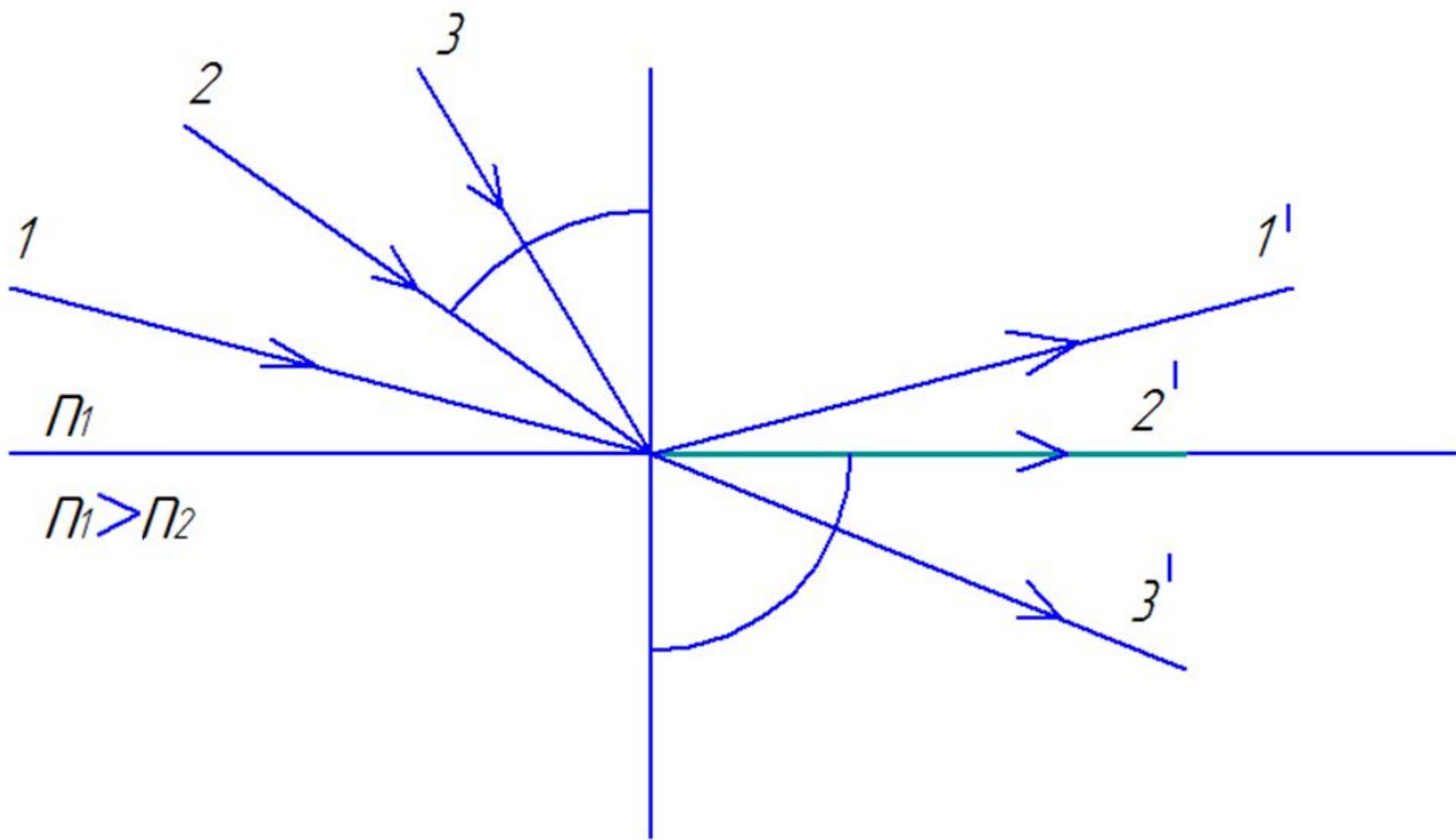
$$C_1=C_0/n_1 \quad C_2=C_0/n_2$$

Отсюда следует еще одна форма закона Снеллиуса—отношение \sin угла падения к \sin угла преломления равно обратному отношению соответствующих показателей преломления:

$$\sin\alpha/\sin\beta=n_2/n_1$$

Полное внутреннее отражение:

Если луч света (3) падает на поверхность раздела между средой с показателем преломления n_1 и средой с показателем преломления $n_2 < n_1$ под постоянно уменьшающимся углом, т.е. с постепенно увеличивающимся углом падения α_1 , то при определенном угле падения α_0 угол преломления становится равным $\beta_0 = 90^\circ$

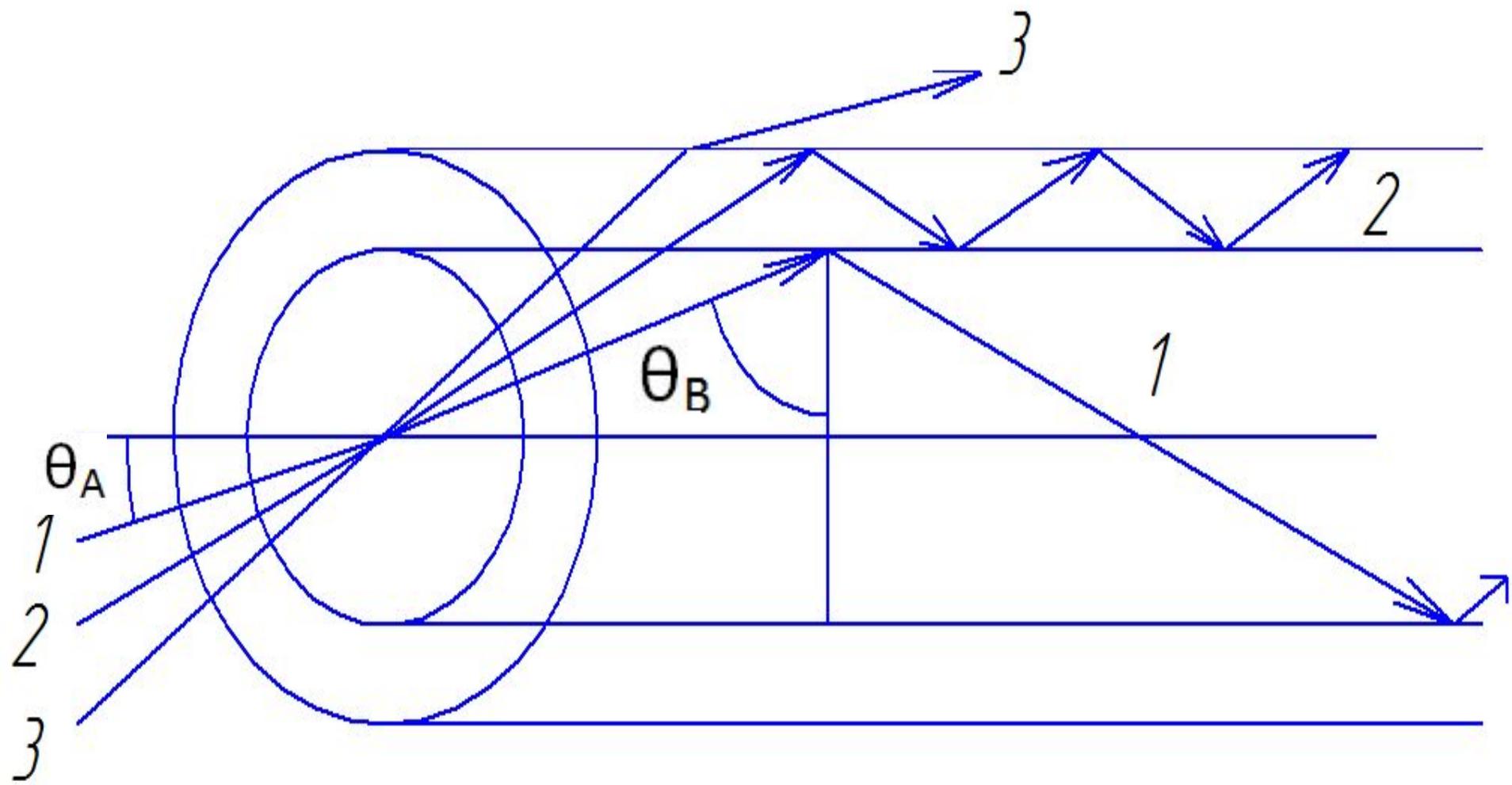


Угол падения α_0 называется критическим (предельным) углом двух сред

$$\sin \alpha_0 = n_2 / n_1$$

Для всех лучей, у которых угол падения α больше критического α_0 , не существует соответствующих преломленных лучей в оптически менее плотной среде. Эти лучи света отражаются на поверхности раздела обратно в оптически более плотную среду—это явление называется полное внутреннее отражение.

Полное внутреннее отражение происходит тогда, когда луч распространяется из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду и никогда в обратном случае. Для этого нужно чтобы $n_1 > n_2$.



- 1-направляемая волна.
- 2-вытекаемая волна.
- 3-излучаемая волна.
- θ_A -апертурный угол.

Апертурным углом называется угол между осью оптического волокна и одной из образующих светового конуса, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения.

$$\sin\theta_B = n_2 / n_1 \quad n_1 > n_2$$

n_2/n_1 близко к единице, т.к. n_1 и n_2 почти одинаковы.

Чем больше θ_B , тем меньше θ_A , тем лучше условия распространения.

$$\theta_A = 90^\circ - \theta_B$$

- Максимально возможный угол ввода $\theta_{A \max}$ называется входной угловой апертурой световода. Она зависит только от двух показателей преломления: n_1 и n_2 . Синус входной угловой апертуры называется числовой апертурой NA световода (эта величина очень важна для ввода света в ВС):

- $NA = \sin \theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

Параметры ОК.

1. Числовая апертура

$$NA = \sin \theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

2. Нормированная (характеристическая) частота — один из важнейших обобщающих параметров, используемых для оценки свойств ОВ, который связывает его структурные параметры и длину световой волны, распространяемой в волокне. Также этот параметр используется для расчета критической частоты.

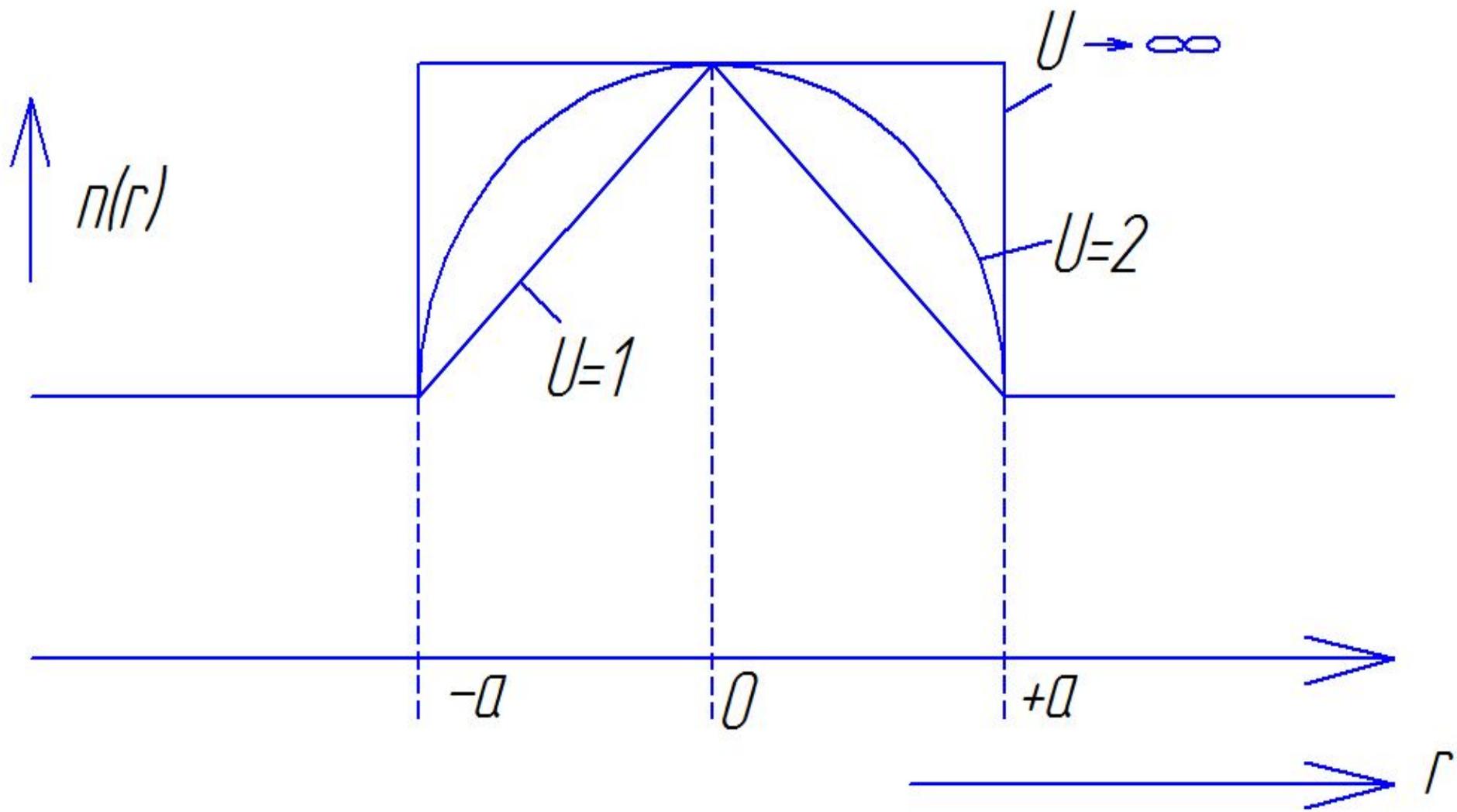
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} NA$$

Типы оптических волокон.

Если рассматривать показатель преломления n волоконного световода (ВС) как функцию от радиуса r , то используется термин профиль распределения показателя преломления. С его помощью описывается радиальное изменение показателя преломления от оси волокна в стекле сердцевины в направлении стекла оболочки:

$$n=n(r)$$

Распределение мод в ВС зависит от формы этого профиля распределения показателя преломления (ППП):



Для практического применения важным являются профили распределения показателя преломления, описываемые по степенному закону (степенные профили). Под ними понимаются профили ПП, у которых кривая изменения по радиусу описывается как степенная функция радиуса:

$$n_r = n_0 (1 - 2\Delta(r/a)u)^{1/2} \quad \text{для } r < a \quad (\text{в сердцевине})$$

и

$$n^2(r) = n_2^2 = \text{const} \quad \text{для } r \geq a \quad (\text{в оболочке})$$

где

n_0 – показатель преломления в центре сердцевины;

u – ПП вдоль оси ОР;

- Δ – нормированная разность показателей преломления;

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

- r – расстояние от оси ОВ, мкм;
- a – радиус сердцевины, мкм;
- u – показатель степени профиля;
- n_2 – ПП оболочки.
- Если: $u=1$ – треугольный профиль;
- $u=2$ – параболический профиль;
- $u \rightarrow \infty$ – ступенчатый профиль;

Лишь в последнем случае—при ступенчатом профиле $n(r) = n_1$ в стекле сердцевины остается постоянным. Для всех других ППП $n(r)$ в стекле сердцевины постепенно увеличивается от n_2 для стекла оболочки до n_1 у оси ВС. Поэтому такие профили называют градиентными ПРПП. Это название особенно хорошо закрепилось за параболическим профилем, имеющим $u=2$.

Также ОВ делятся по числу передаваемых по ним мод.

Мода—определенный тип волны, который может распространяться в данном ВС.

Исходя из этого, оптические волокна делятся на:

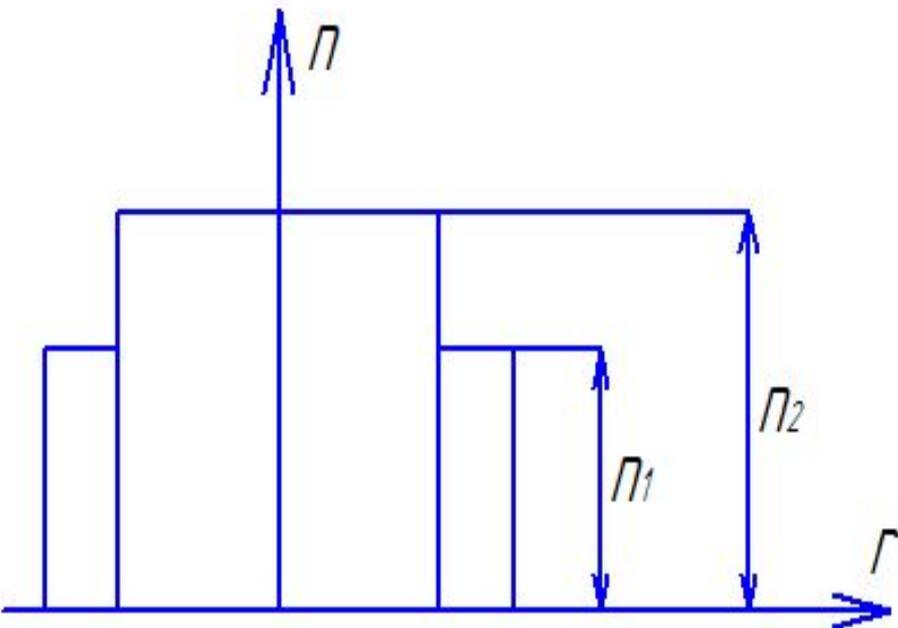
- многомодовые (МОВ)—в этих ОВ распространяется очень много различных типов волн (мод) (или лучей).
- одномодовые (ООВ)—распространяется только одна мода.

Существует 3 основных типа ОВ:

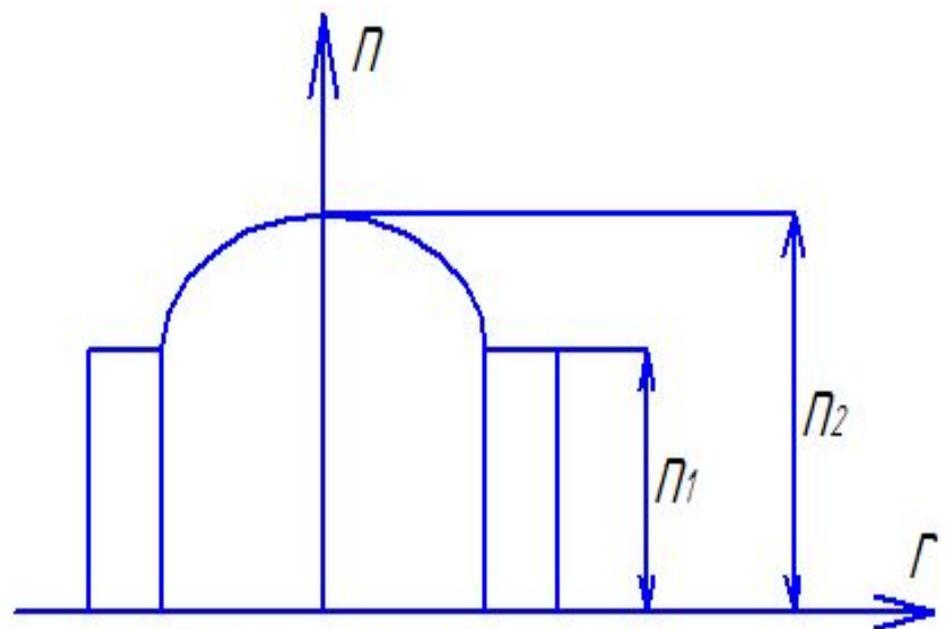
СМОВ—ступенчатое многомодовое ОВ;

ГМОВ—градиентное многомодовое ОВ;

СООВ—ступенчатое одномодовое ОВ;



$d_1=50 \text{ MKM (62,5 MKM)}$
 CMOB



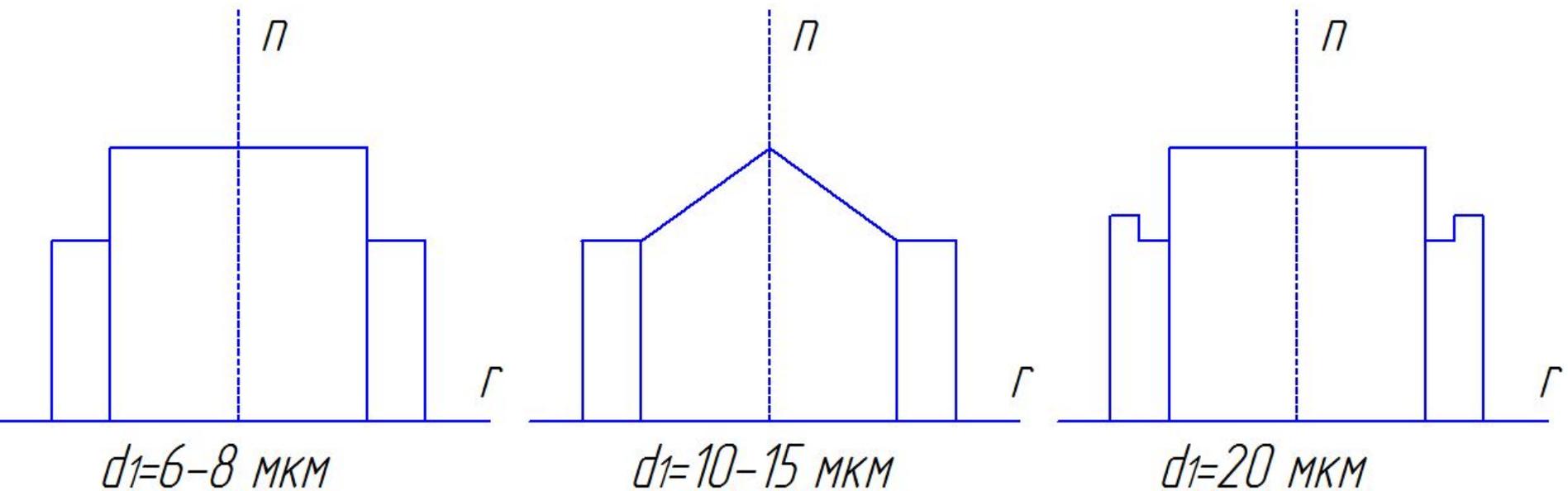
$d_1=50 \text{ MKM (62,5 MKM)}$
 ГМОВ

Для СМОВ $\lambda \ll d$

ГМОВ $\lambda \ll d$

Для ООВ $\lambda \leq d$

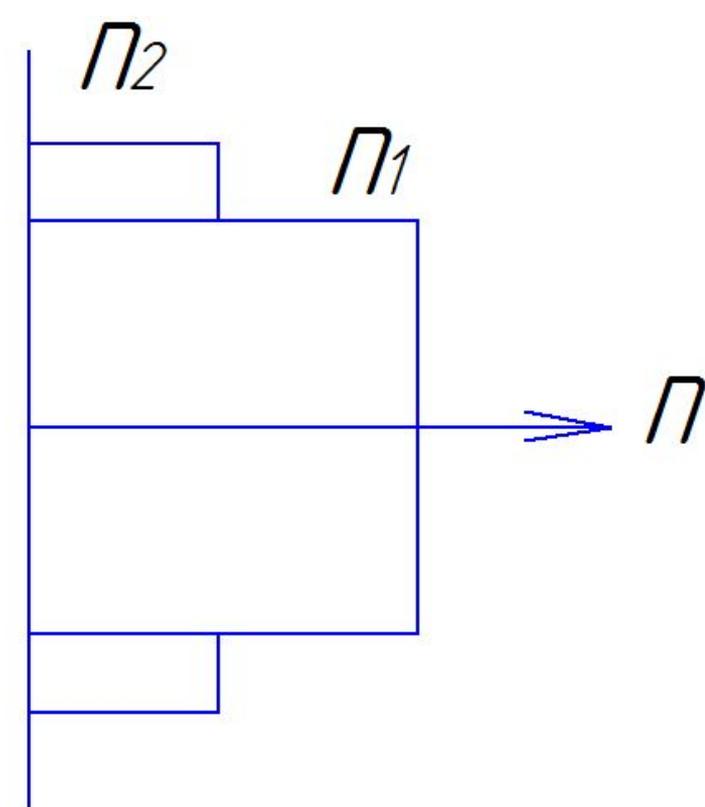
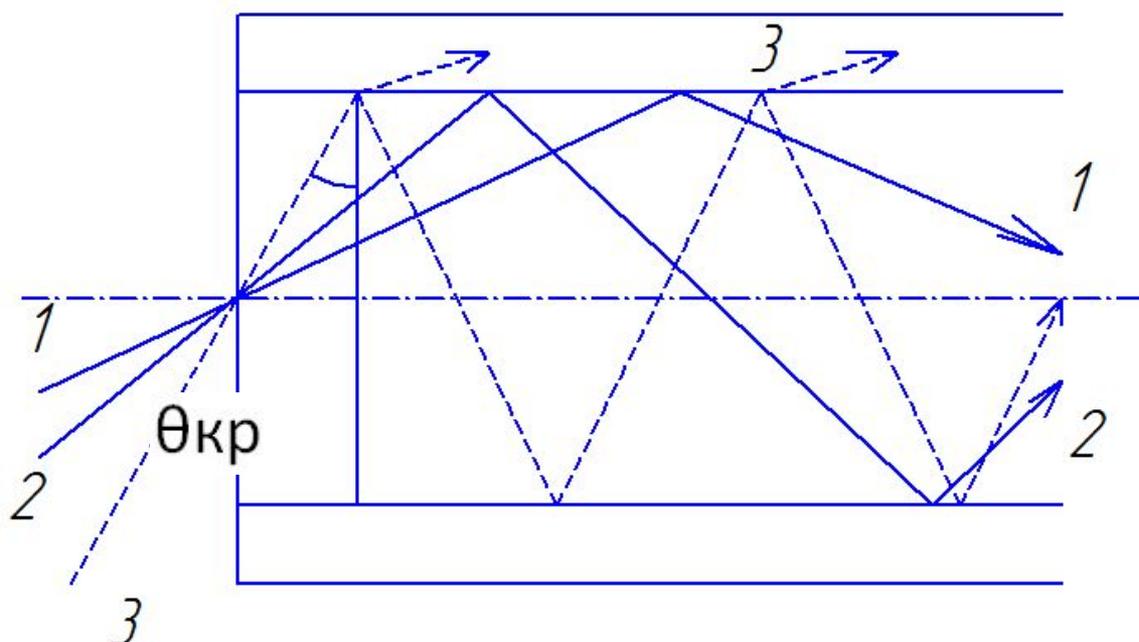
Одномодовые волокна

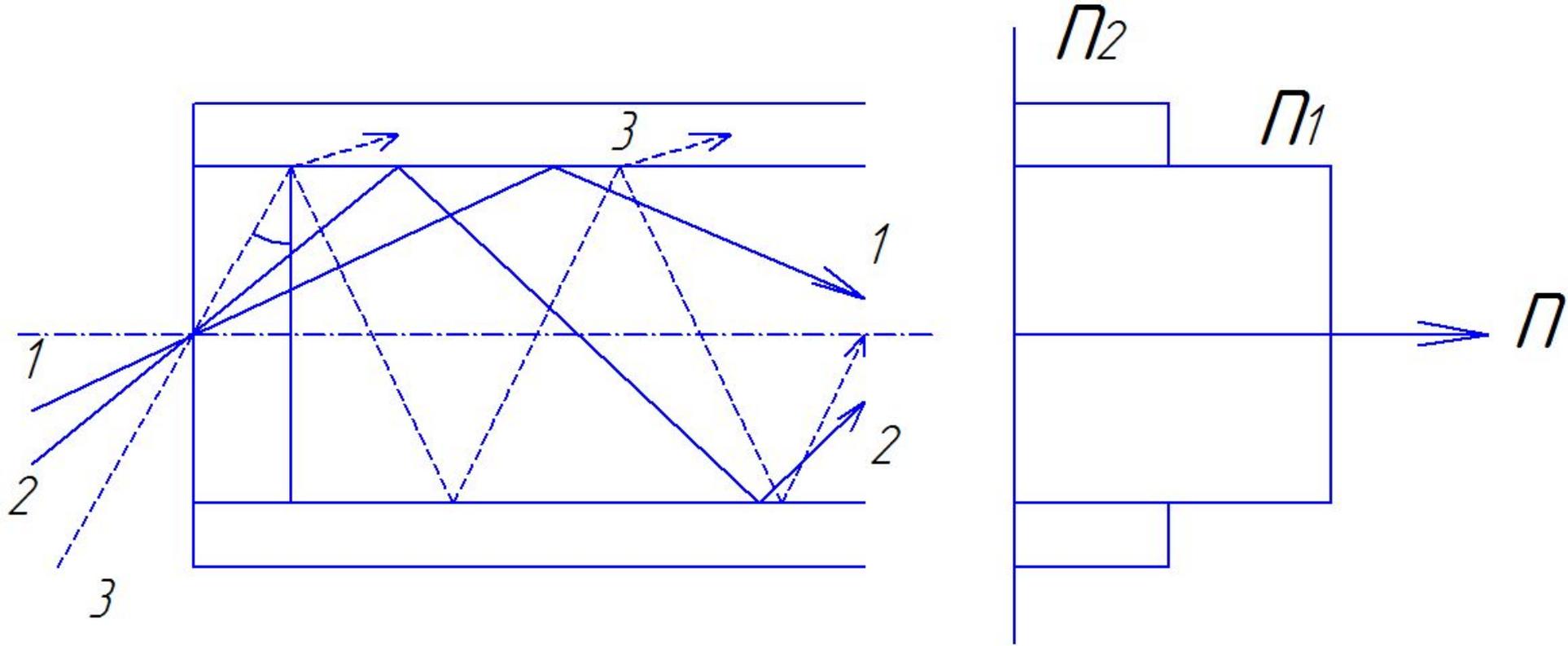


$$n = \sqrt{\mu\epsilon}; \quad n_1 = \sqrt{\epsilon_1}; \quad n = \sqrt{\epsilon_2}; \quad \mu = 1 \quad (\text{для стекла})$$

Оптические волокна со СППП.

Чтобы распространялся свет в оптических волокнах данного типа, необходимо иметь ПП n_1 стекла сердцевины немного больше ПП n_2 стекла оболочки на границе раздела двух сред. Если ПП n_1 одинаков по всему поперечному сечению сердцевины, то говорят, что ПП имеет ступенчатый профиль, т.к. при переходе от стекла оболочки к сердцевине ПП возрастает ступенеобразно и остается там неизменным. Такой ВС называется световодом со СППП или ступенчатым световодом.





- СМОВ:

- - диаметр сердцевины $2a = 100$ мкм;
- - диаметр оболочки $D = 140$ мкм;
- - ПП сердцевины $n_1 = 1,48$;
- - ПП оболочки $n_2 = 1,46$;

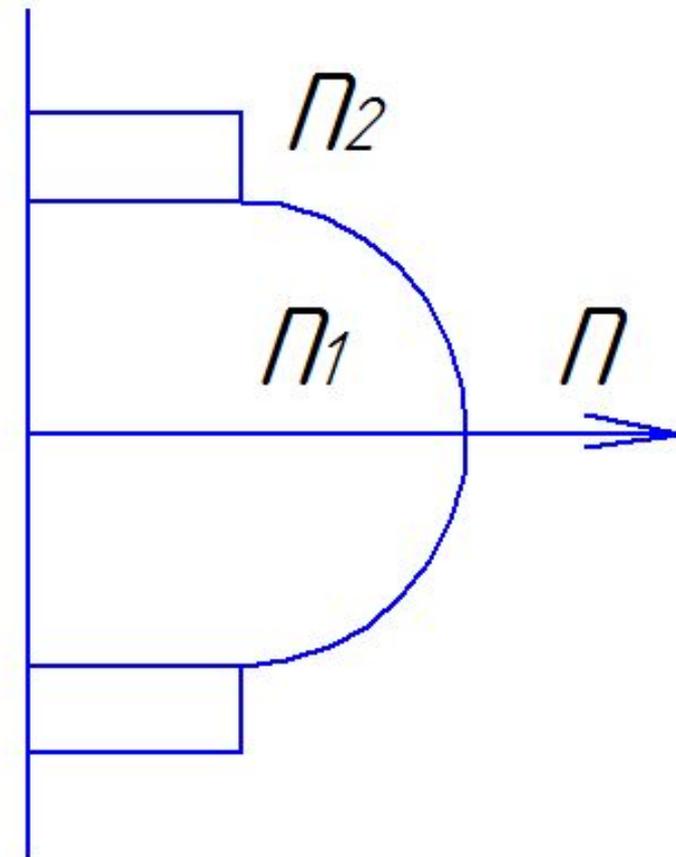
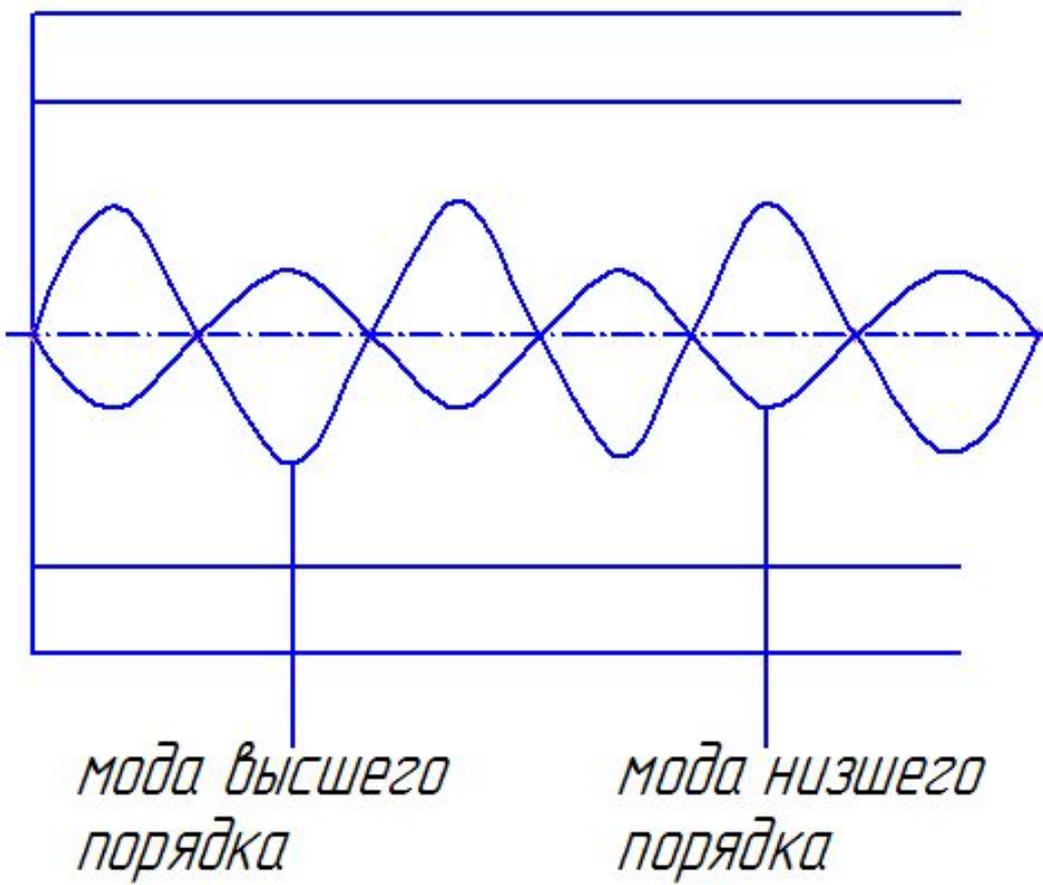
Оптические волокна с ГПП.

В данных ОВ ПП сердцевины уменьшается параболически от максимальной величины n_0 у оси световода до величины ПП n_2 на поверхности раздела с оболочкой.

Лучи света проходят по ОВ по волно- и винтообразным спиральным траекториям. При переходе от одной области к другой не наблюдается скачкообразного перехода от n_1 к n_2 (как у СОВ). В силу диффузии в процессе производства ОВ этот переход осуществляется плавно, т.е. ОВ-на у которых ПП сердцевины изменяется по радиусу плавно, называют градиентными.

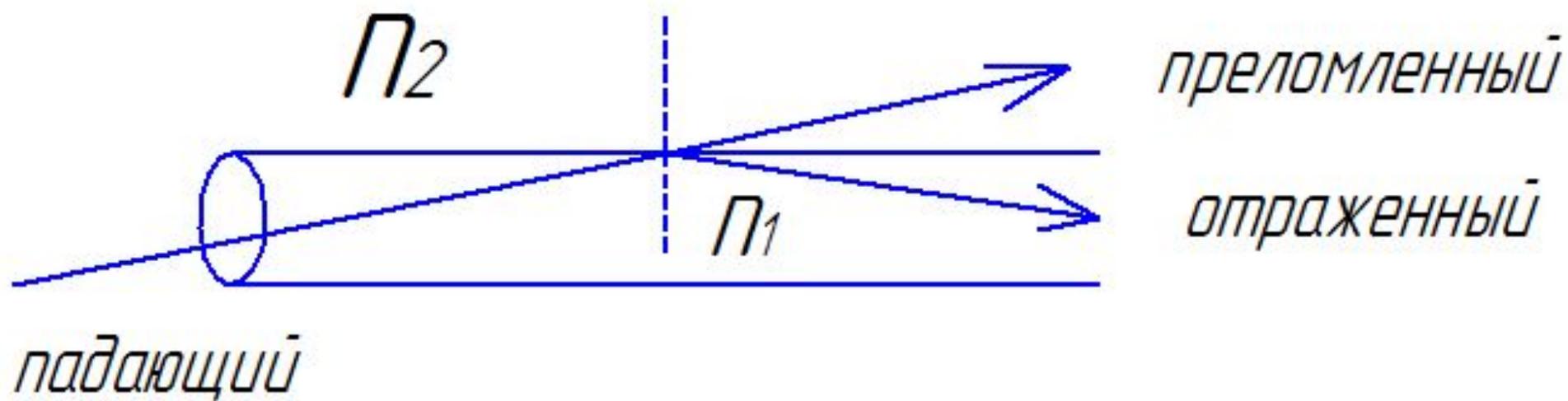
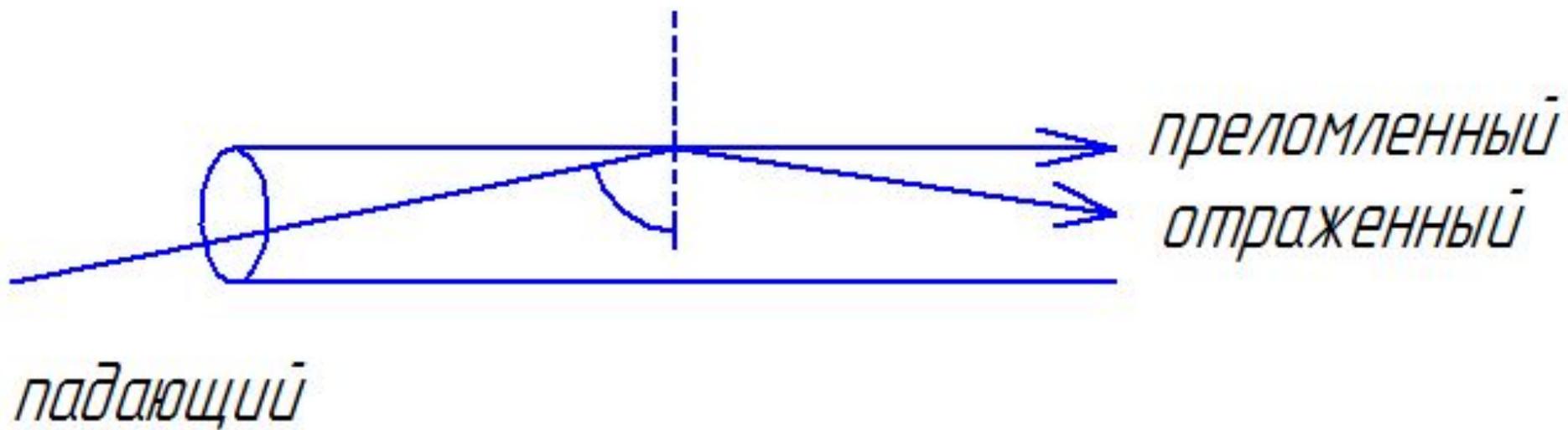
В противоположность СПП, лучи распространяются уже не зигзагообразно. Вследствие непрерывного изменения ПП $n(r)$ сердцевины лучи непрерывно преломляются, и поэтому их направление распространения меняется, за счет чего они распространяются по волновым траекториям. Лучи, колеблющиеся вокруг оси волновода, проходят более длинный путь, чем луч света вдоль оси световода.

Во внеосевой области (ближе к границе раздела сред) ПП сердцевины n_1 меньше, чем на оси, и лучи там будут распространяться быстрее, чем вдоль оси.



Апертура волокна

Сердцевина и оболочка волокна выполнены из прозрачного для света материала, поэтому лучи могут проникать из сердцевины в оболочку, а это ведет к потерям. Чтобы не было потерь, нужно чтобы луч света распространялся только по сердцевине. А это возможно только тогда, когда выполняется условие полного внутреннего отражения.



С увеличением радиуса сердцевины волокна величина V растет, а с увеличением длины волны уменьшается.

3) Число мод в ОВ.

Рассчитывается по формуле:

- для ступенчатых ВС:

$$N = \frac{V^2}{2} \approx \left(\frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \right)^2 \Delta$$

- для градиентных ВС:

$$N = \frac{V^2}{4} \approx \left(\frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \right)^2 \frac{\Delta}{2}$$

Где

$$n = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

-для произвольного ППП:

$$N = \frac{V^2}{2(1 + 2/n)}$$

Где n —показатель степени изменения профиля показателя преломления.

Для уменьшения числа мод необходимо уменьшать диаметр и Δ .

Режимы работы световода.

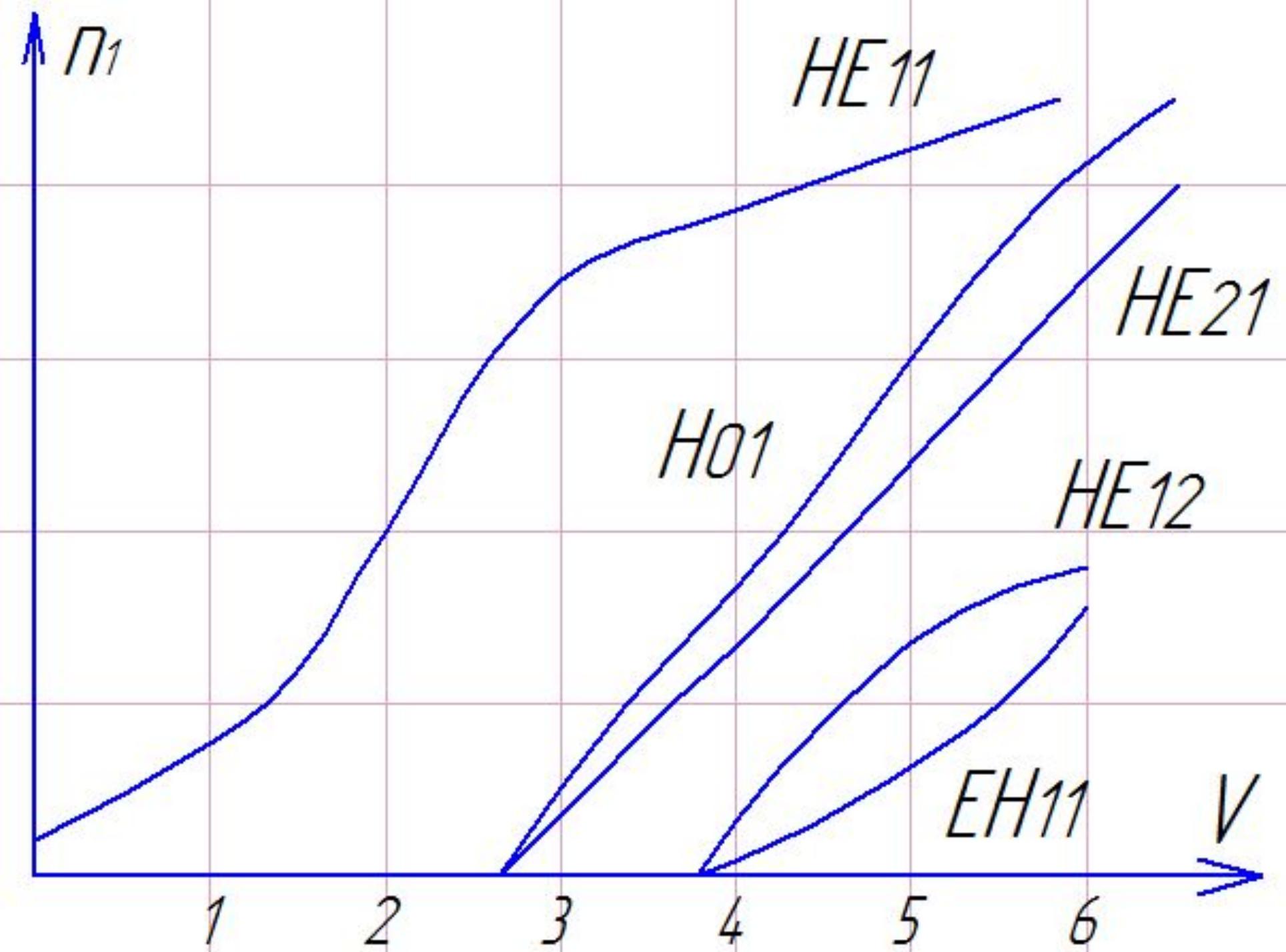
Обычно режим работы световода характеризуется обобщенным параметром V , включающим радиус сердцевины, длину волны и коэффициенты преломления сердцевины n_1 и оболочки n_2 .

В ВС при очень высоких частотах почти вся энергия поля концентрируется внутри сердцевины световода, с уменьшением частоты происходит перераспределение поля, и оно переходит в окружающее пространство. Этому условию соответствует по закону геометрической оптики угол полного внутреннего отражения, при котором отсутствует преломленный луч, по входному торцу световода—апертурный угол. При определенной частоте, называемой критической, или частотой отсечки, поле больше не распространяется вдоль световода и вся энергия рассеивается в окружающем пространстве.

Для определения длин волн отсечки в волновой теории рассматривают корни Бесселевых функций, определяющих решение волновых уравнений. При частоте отсечки их аргументы дБ равны нулю, определяя тип волны и нормированную частоту V_0 , при которой становится возможным распространение данного типа волны (моды).

Таким образом, каждая мода имеет нормированную частоту, которая определяет область ее существования.

При $V < V_0$ волна по сердцевине волокна не распространяется, т.е. не существует. Ее область существования определяет нормированная частота $V > V_0$.



Только для несимметричной волны HE_{11} значение $V_0=0$, следовательно, эта волна не имеет критической частоты и может распространяться при любой частоте и диаметре сердцевины. Все другие волны не распространяются на частотах ниже критической. С увеличением нормированной частоты появляются новые типы волн.

Если $V < 2,405$, то это одномодовый режим работы ВС;

Если $V \geq 2,405$, то устанавливается многомодовый режим передачи.

Критическая частота определяется по

$$f_{\text{кр}} = \frac{P_{nm} \cdot C}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \text{ Гц}$$

Где: C —скорость света;

P_{nm} —значения корней функции Бесселя для различных типов волн;

d — диаметр сердцевины ОВ.

Критическая длина волны— это та длина волны, больше которой передача

э

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{\pi d}{P_{nm} \cdot n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \text{ МКМ}$$