

**Тема 1. «Линии передачи электромагнитных волн».**

**Групповое занятие №3**  
**«Волноводы и объемные резонаторы»**

**Время:** 2 аудиторных часа

**Учебные вопросы:**

- 1. Закрытые волноводы.**
- 2. Объемные резонаторы.**

## Цель занятия:

1. Изучить назначение, конструкцию и особенности распространения электромагнитной энергии в закрытом волноводе.

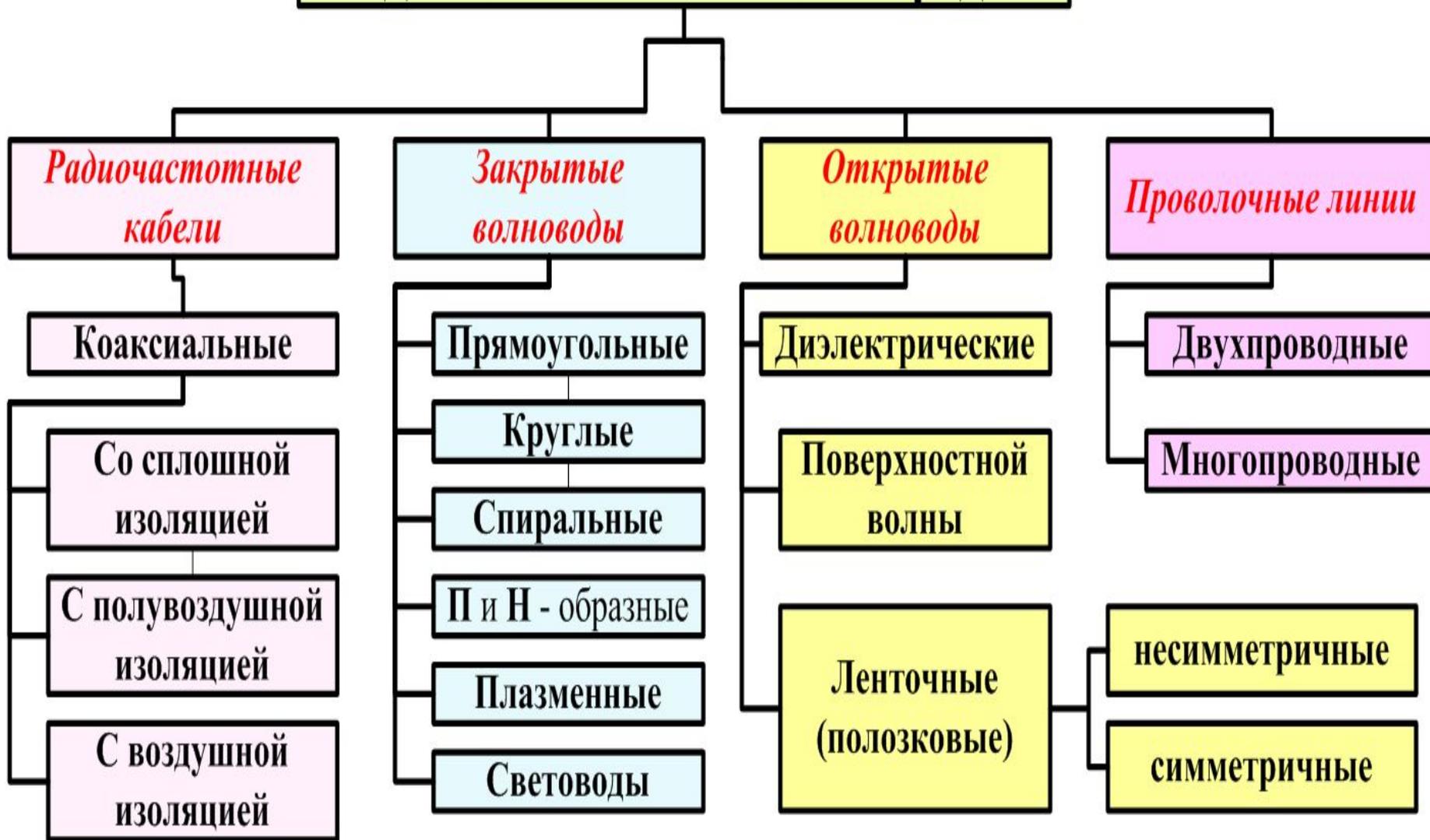
## Основная литература:

[1]. **Белоцерковский, Г. А.** Основы радиотехники и антенны / Г. А. Белоцерковский. - М. : Советское радио, – 1969.

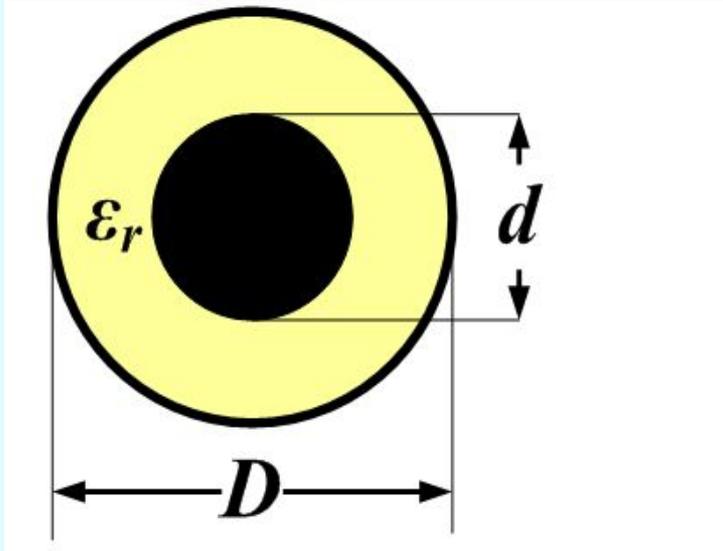
Ч. 1 : Основы радиотехники. – 432 с.

**Стр. 362 – 396.**

# Радиочастотные линии передач



# Коаксиальная линия



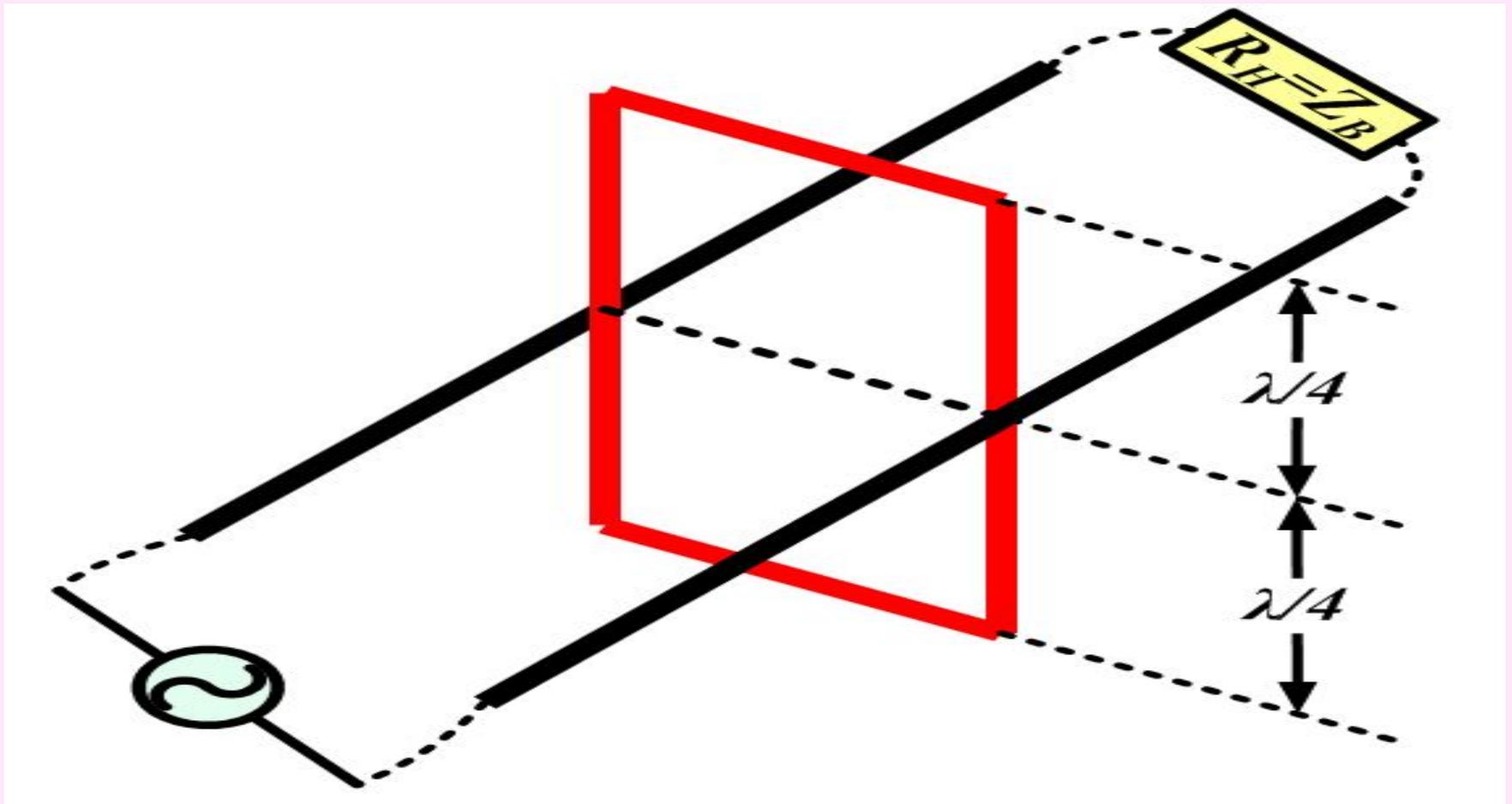
$$Z_B = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} 138 \cdot \lg \frac{D}{d}$$

С повышением частоты увеличивается сопротивление внутреннего провода из-за поверхностного эффекта.

Увеличение диаметра внутреннего провода может привести к пробое.

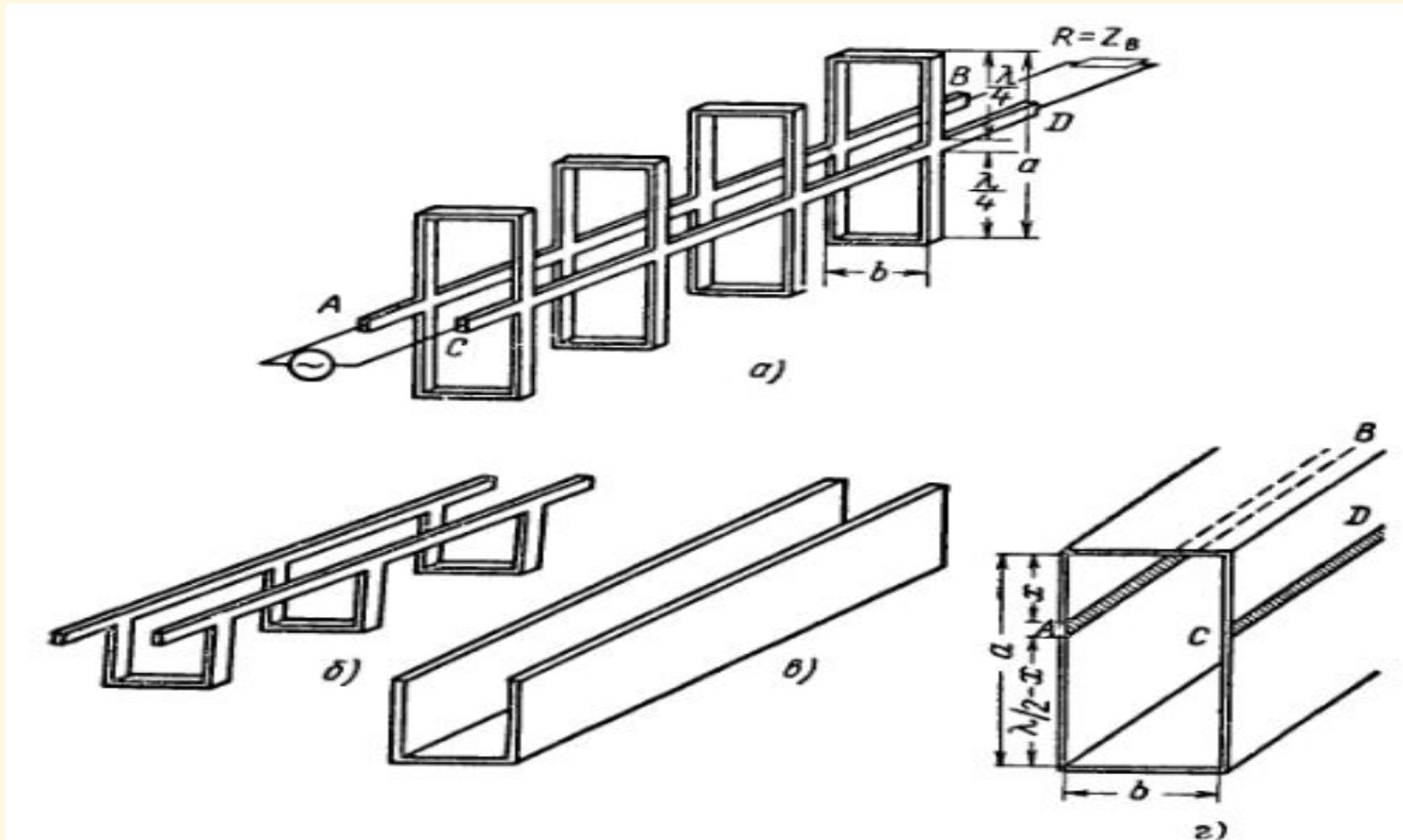
Увеличение диаметра обоих проводов ведет к увеличению габаритов.

Приставим к проводам линии передач сверху и снизу отрезки линий закороченных на конце длиной  $\lambda/4$ . Так как их входное сопротивление  $Z_{BX} = \infty$ , то это не приведет к изменению физических процессов в линии.



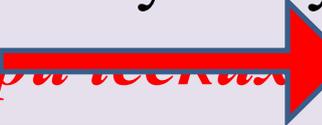
Если увеличить количество таких отрезков до бесконечности, то они образуют стенку трубы-волновода.

Такая конструкция не препятствует распространению бегущих волн в продольном направлении и создает стоячие волны в поперечном сечении.



# Особенности и преимущества волноводов

В волноводе электромагнитные волны сосредоточены между проводящими поверхностями  *потерь на излучение нет.*

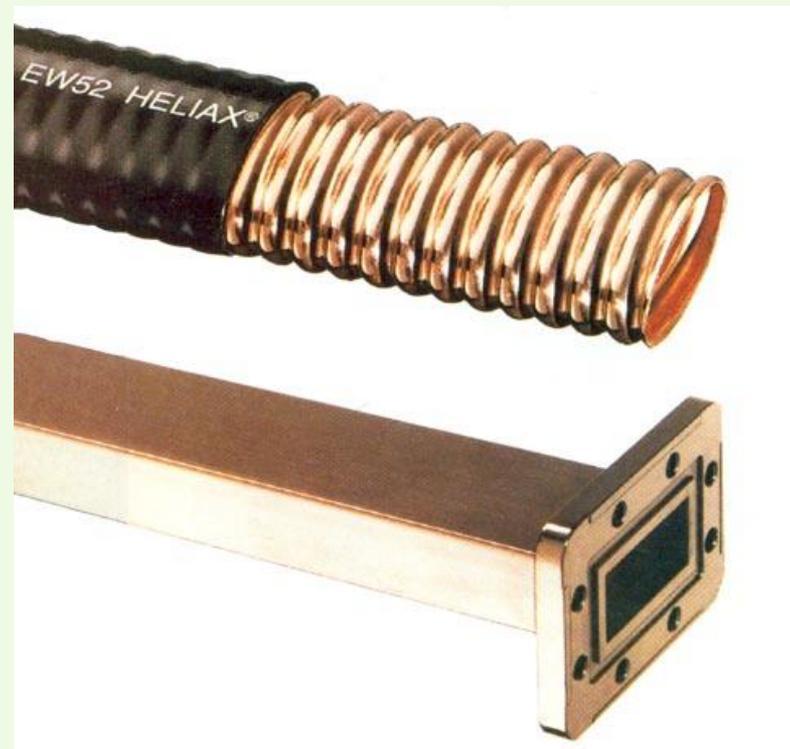
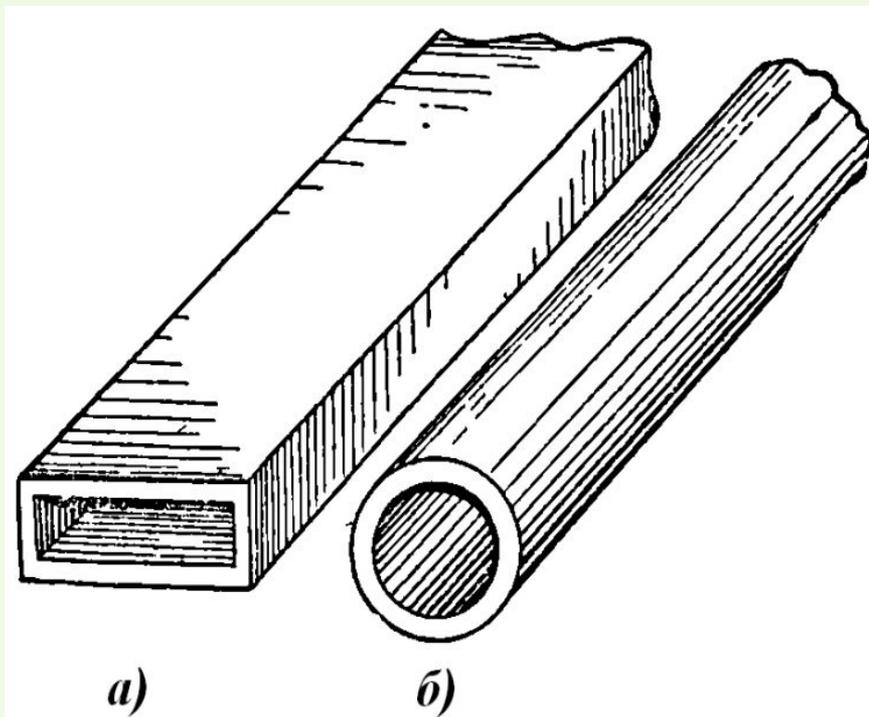
В волноводе отсутствует диэлектрическое наполнение  *нет диэлектрических потерь.*

В волноводе отсутствует внутренний провод, значительно упрощается конструкция, уменьшается опасность пробоя  *можно передать большую мощность).*

Внутреннюю поверхность металлических волноводов покрывают серебром или золотом для лучшей проводимости.

# 1. Закрытые волноводы

*Закрытым волноводом* называется линия передачи, имеющая одну или несколько проводящих поверхностей, с поперечным сечением в виде замкнутого проводящего контура, охватывающего область распространения электромагнитной энергии.



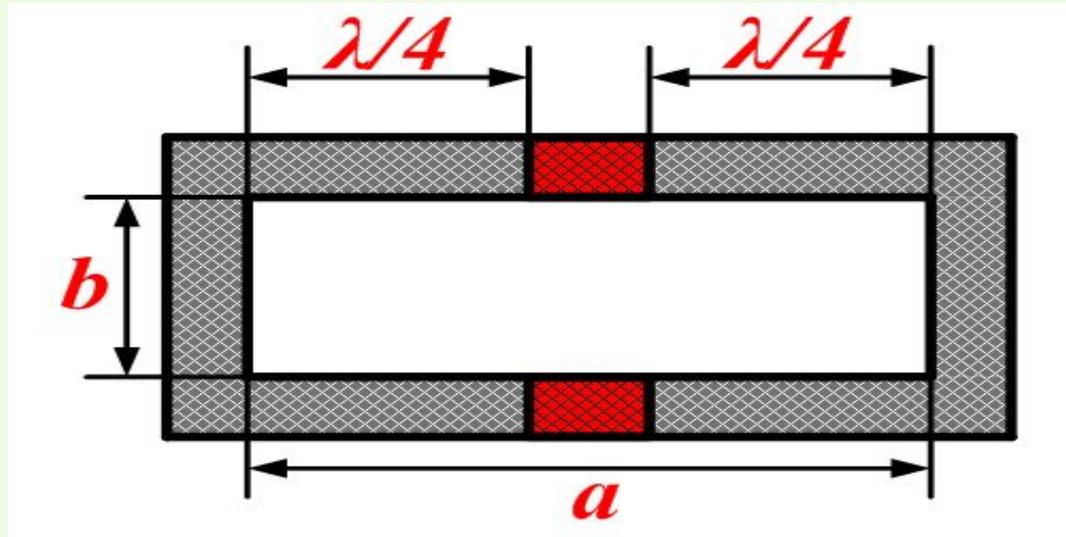
*Закрытые волноводы: а) прямоугольного сечения; б) круглого сечения.*

*Волноводы весьма критичны к длине волны колебаний.*

*Передача*

*электромагнитной энергии возможна если*

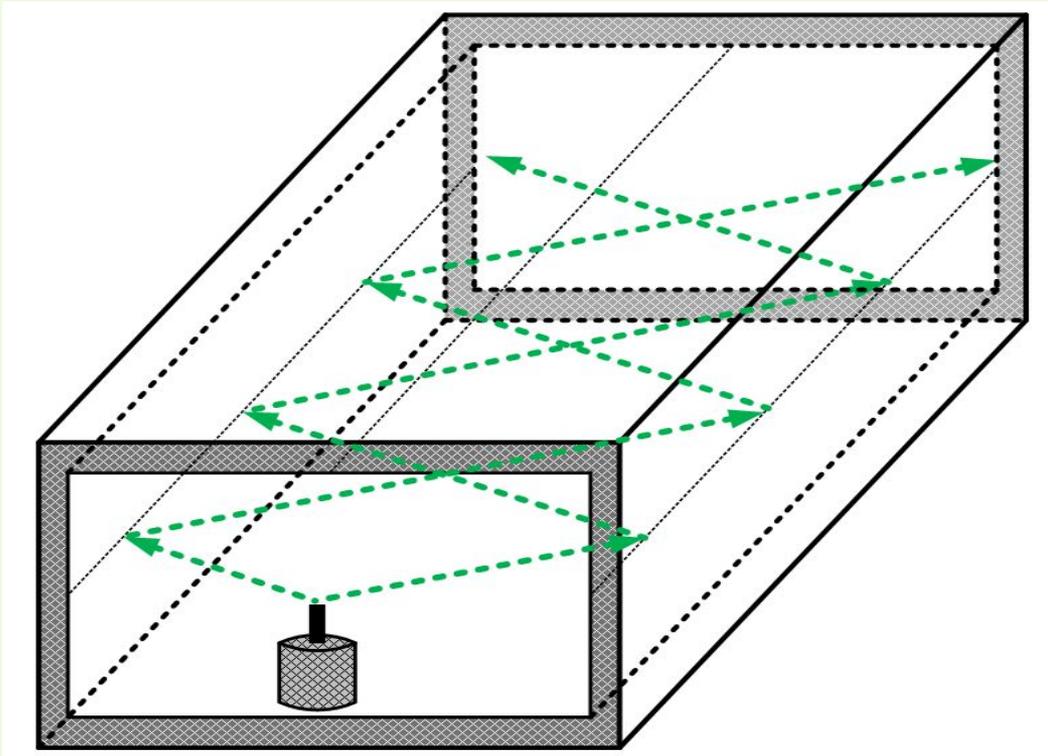
$$\lambda < \lambda_{\text{КРИТ.}}$$



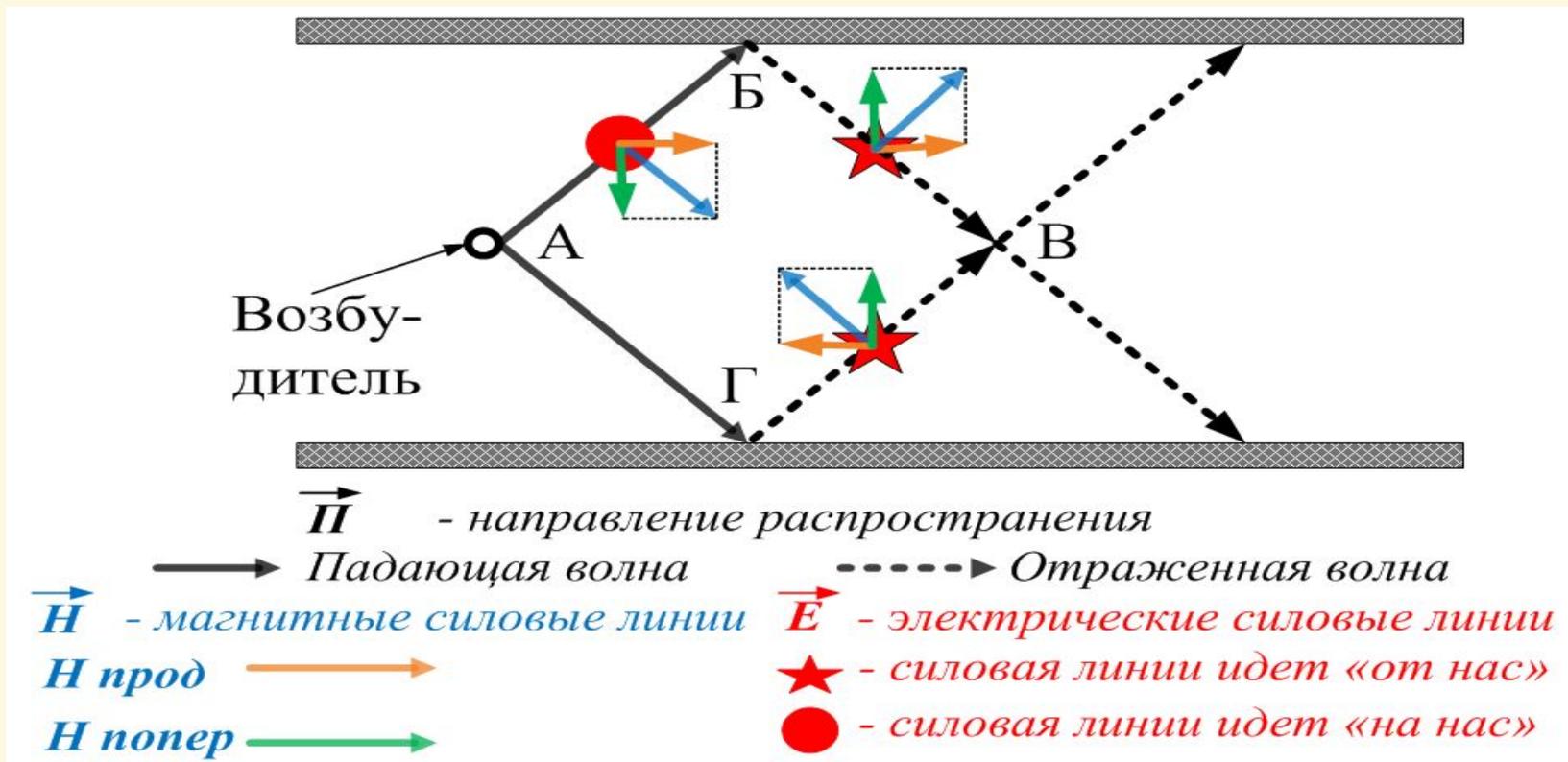
*Предельный случай при котором еще возможно распространение энергии вдоль волновода соответствует равенству  $\lambda/4 = a/2$  следовательно  $\lambda_{\text{КРИТ}} = 2a$ .*

*Если  $a < \lambda/2$ , то высота перемычек становится меньше, чем  $\lambda/4$ , их входное сопротивление резко уменьшается, в бегущие волны вносится большое затухание и передача энергии вдоль волновода становится практически невозможной.*

*Электромагнитные волны обычно возбуждаются в волноводе небольшим излучателем в виде короткого металлического стержня, располагаемого посередине широкой стороны волновода.*



*Излученные им волны достигают стенок волновода, где они возбуждают колебания свободных электронов. Их колебания, в свою очередь, создают излучение - отраженную волну, и т.д.*



### Граничные условия:

- Магнитные силовые линии у поверхности проводника с током параллельны этой поверхности
- Электрические силовые линии не могут идти вдоль поверхности идеального проводника, а всегда перпендикулярны этой поверхности. Значит вектор  $\vec{E}$  у отражающей стенки волновода должен быть равен нулю.

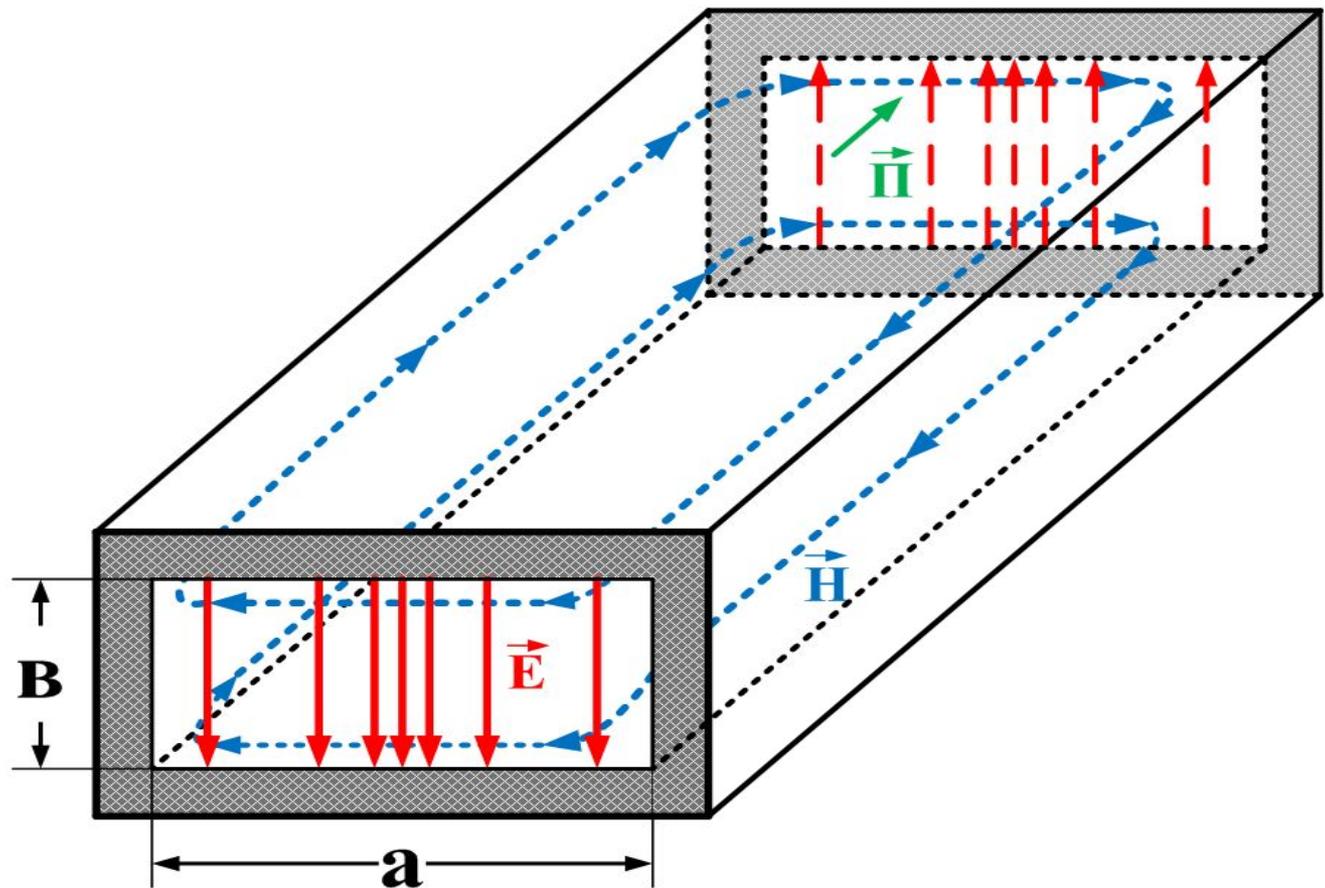
Распространяемые по волноводу электромагнитные волны условно можно разделить на два основных типа.

**Поперечно-электрические (магнитные) волны**, обозначаемые условно **TE** (символ **T** — обозначает поперечные, символ **E** — электрические), либо **H** — волны.

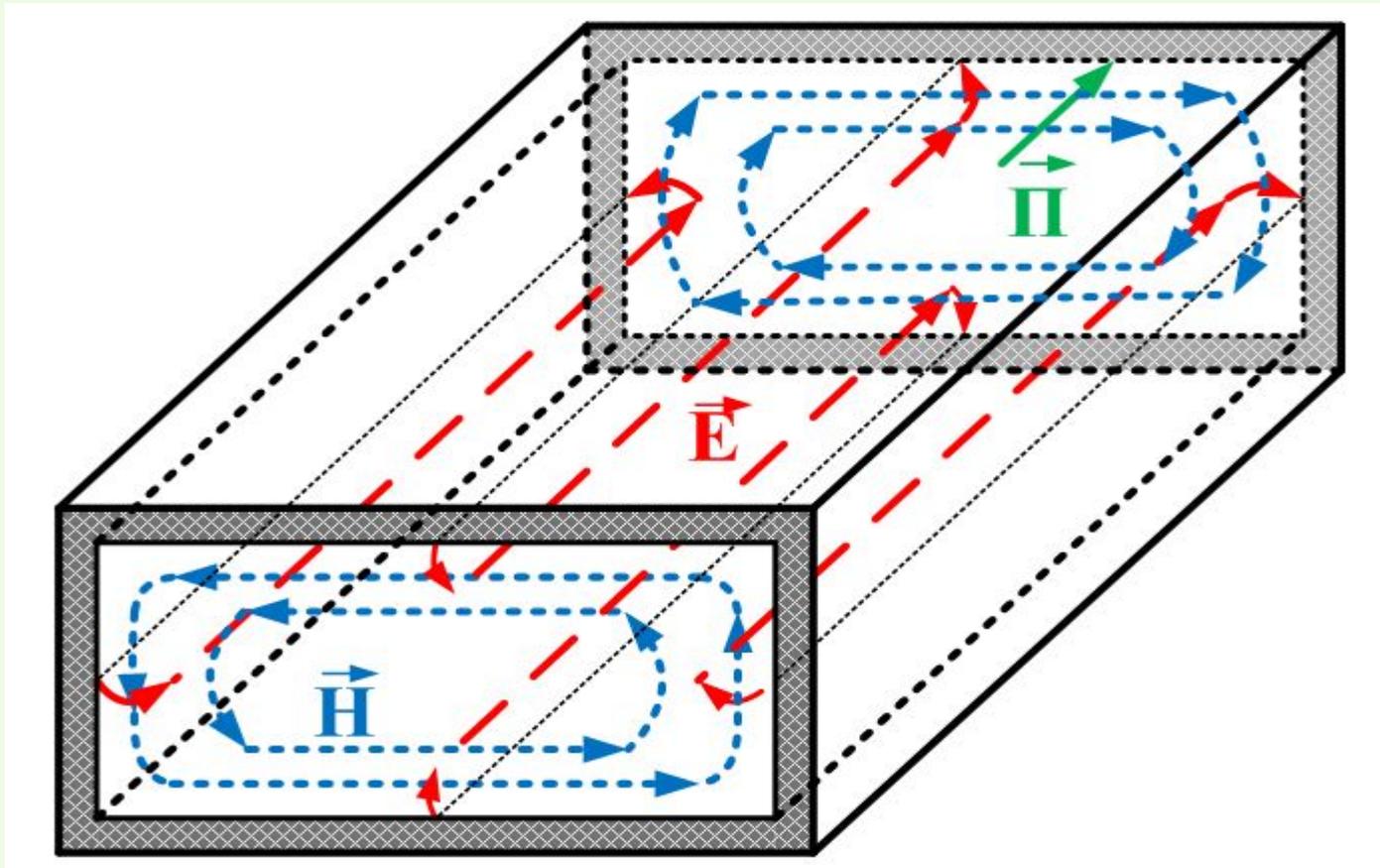
**Поперечно-магнитные (электрические) волны**, обозначаемые условно **TM** либо **E** — волны.

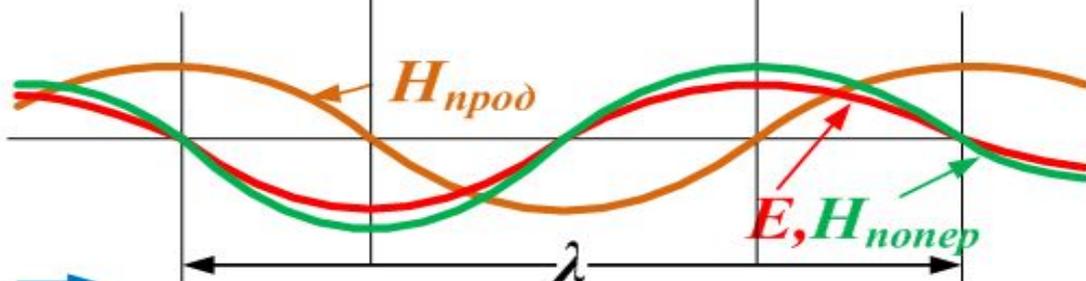
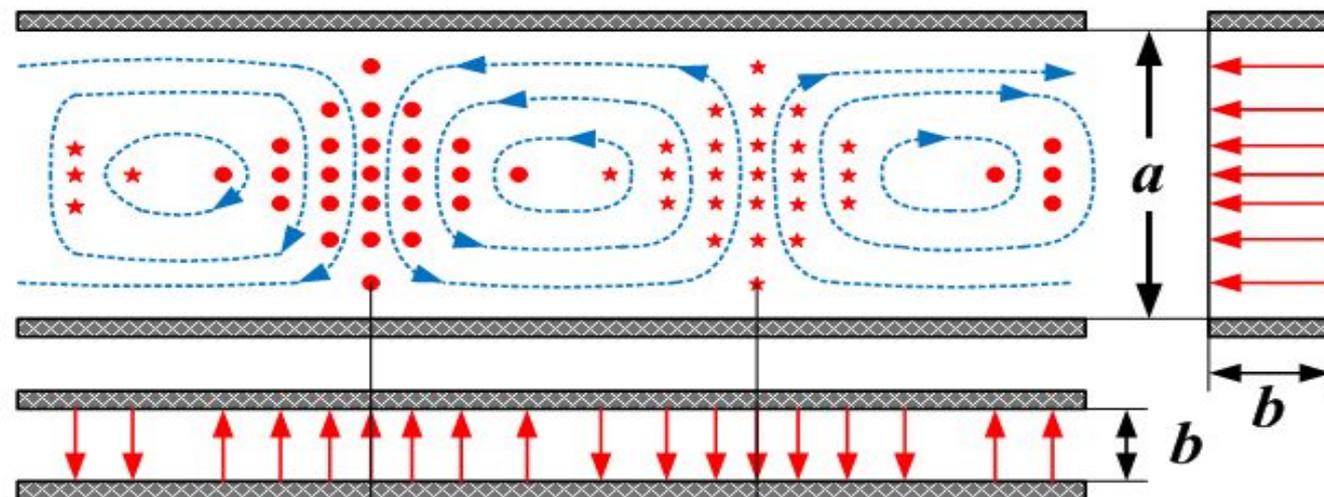
Каждый тип волны обозначается соответствующей буквой с индексом из двух цифр (**m**, **n**), показывающим число стоячих полуволн вдоль **большой** (**m**) и **меньшей** (**n**) сторон поперечного сечения волновода. Таким образом, по названию волны можно определить соответствующую ей структуру поля. Например **H<sub>10</sub>**

**Магнитная волна (H-волна)** – электромагнитная волна, вектор напряженности магнитного поля которой имеет поперечную и продольную составляющие, а вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения



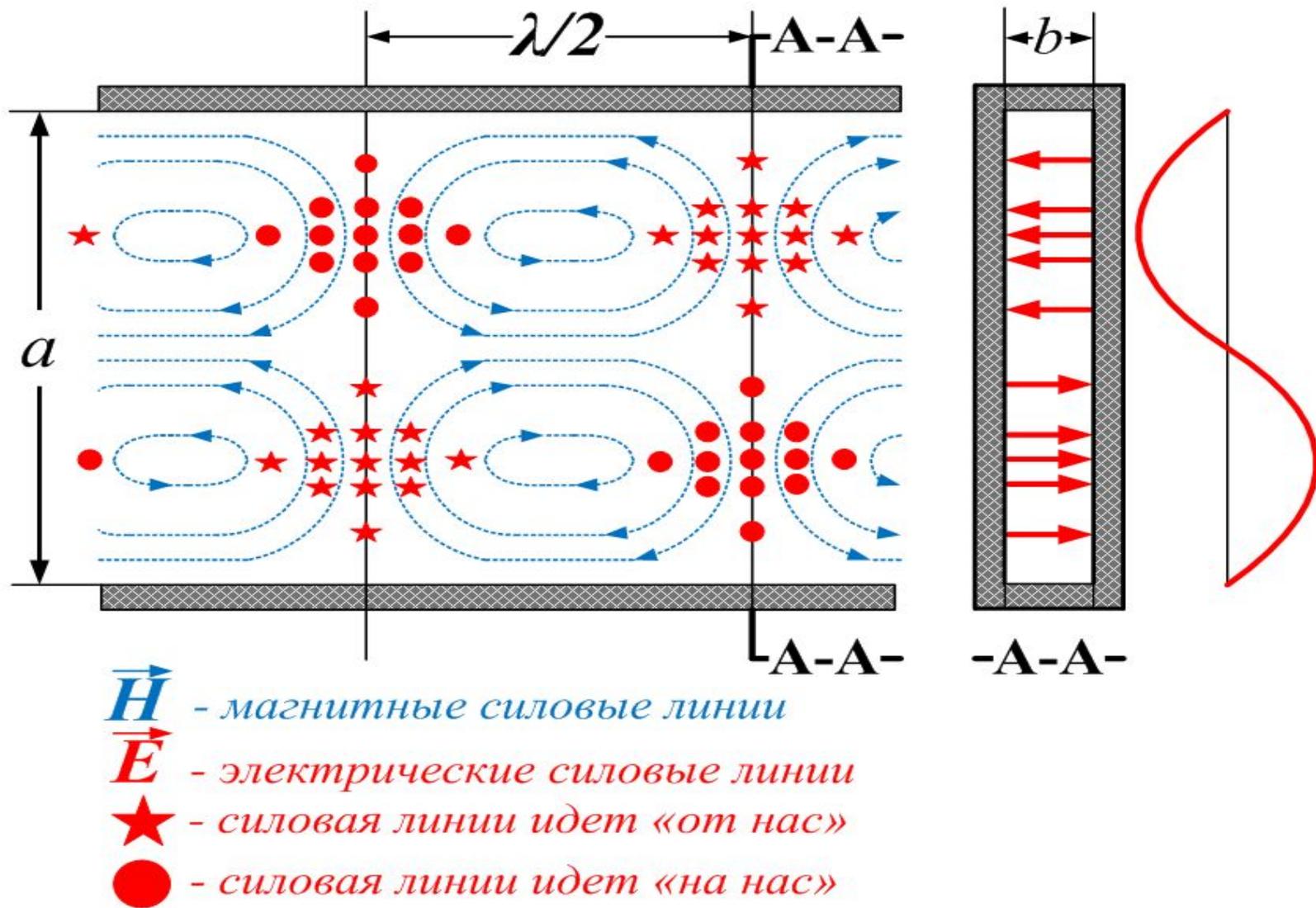
**Электрическая волна (Е-волна)** – электромагнитная волна, вектор напряженности электрического поля которой имеет поперечную и продольную составляющие, а вектор напряженности магнитного поля лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения



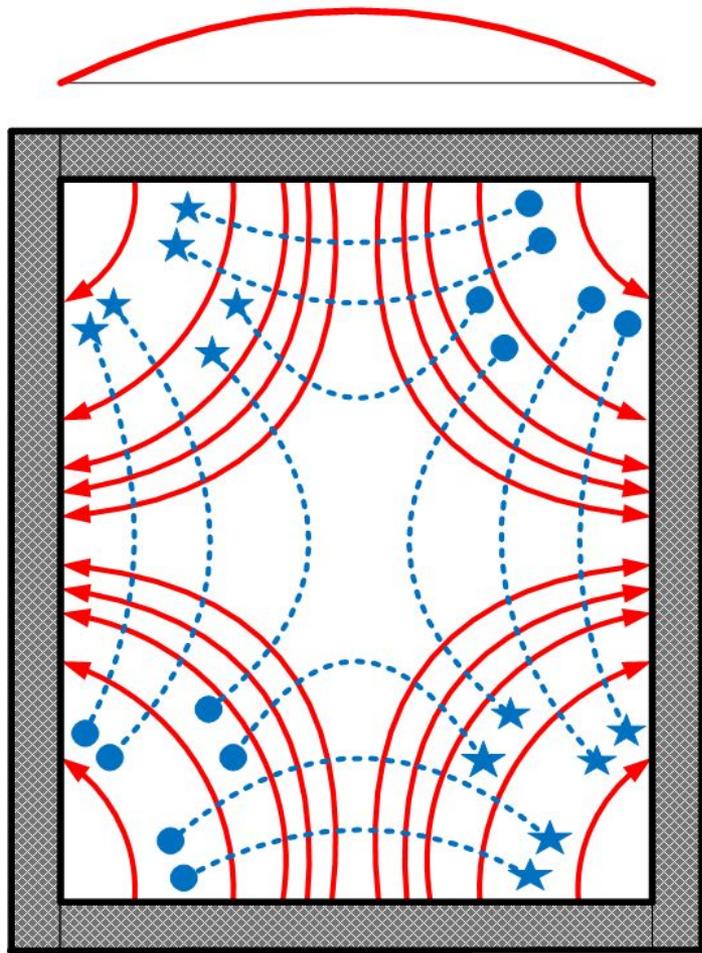


- $\vec{H}$  - магнитные силовые линии
- $\vec{E}$  - электрические силовые линии
- ★ - силовая линии идет «от нас»
- - силовая линии идет «на нас»

Волна  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе

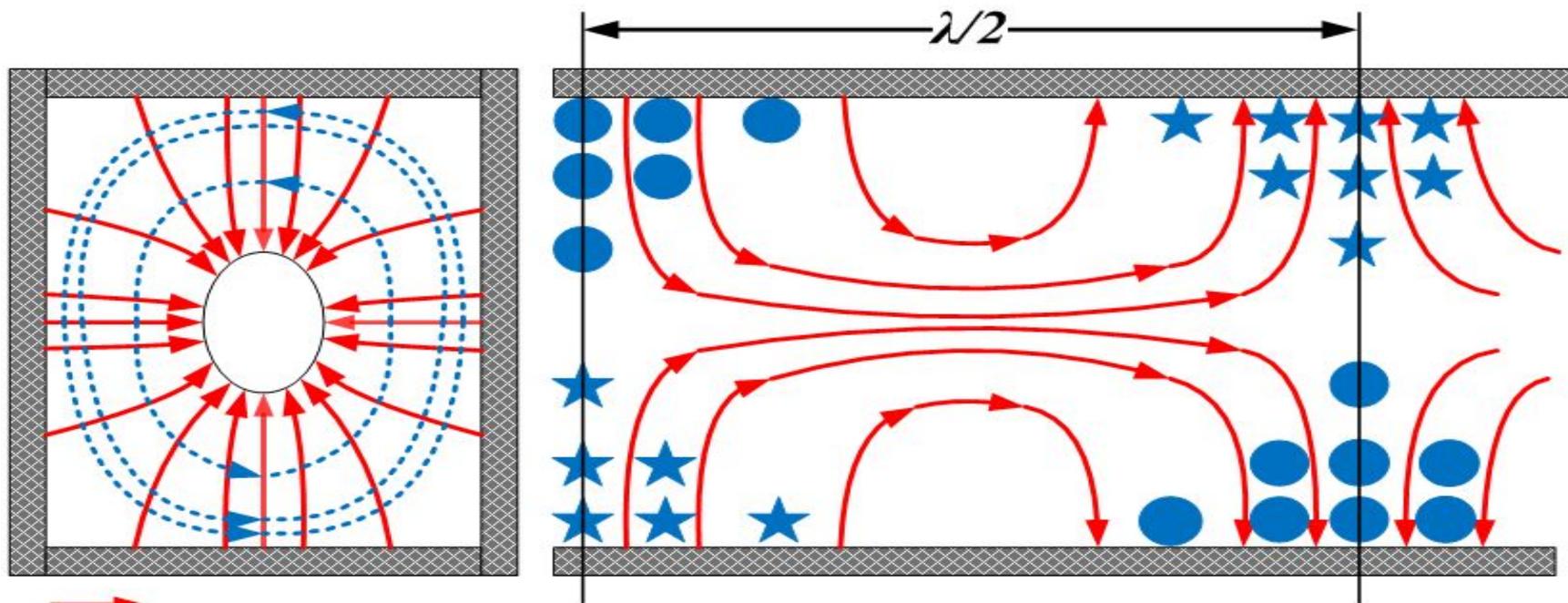


Волна  $H_{20}$  в прямоугольном волноводе



- $\vec{E}$  - электрические силовые линии
- $\vec{H}$  - магнитные силовые линии
- ★ - силовая линии идет «от нас»
- - силовая линии идет «на нас»

Волна  $H_{11}$  в прямоугольном волноводе



$\vec{E}$

- электрические силовые линии

$\vec{H}$

- магнитные силовые линии

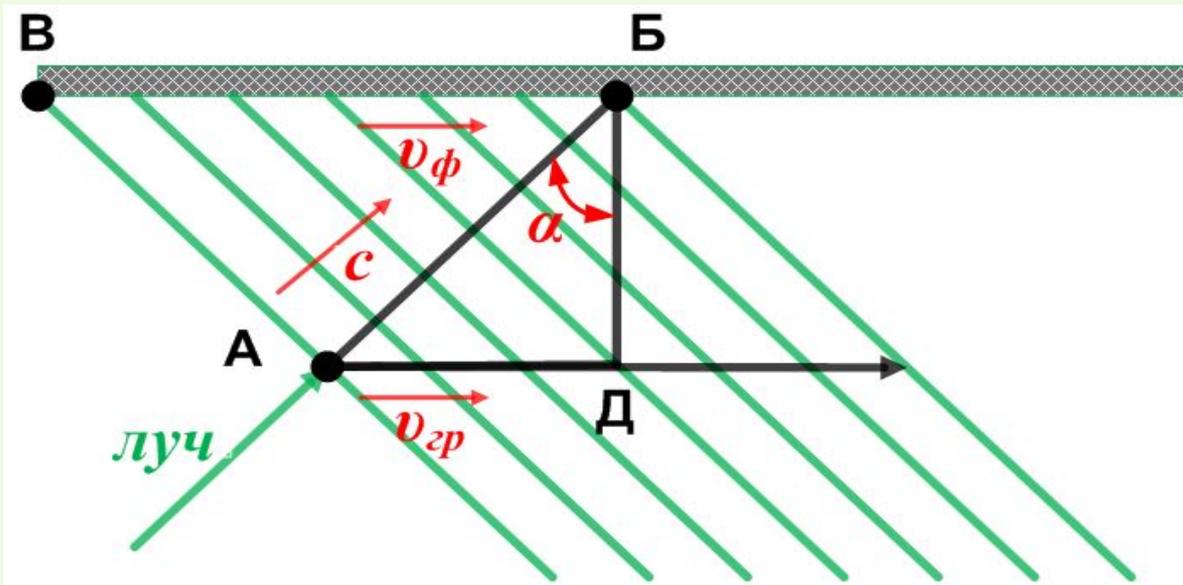


- силовая линии идет «от нас»



- силовая линии идет «на нас»

Волна  $E_{11}$  в прямоугольном волноводе



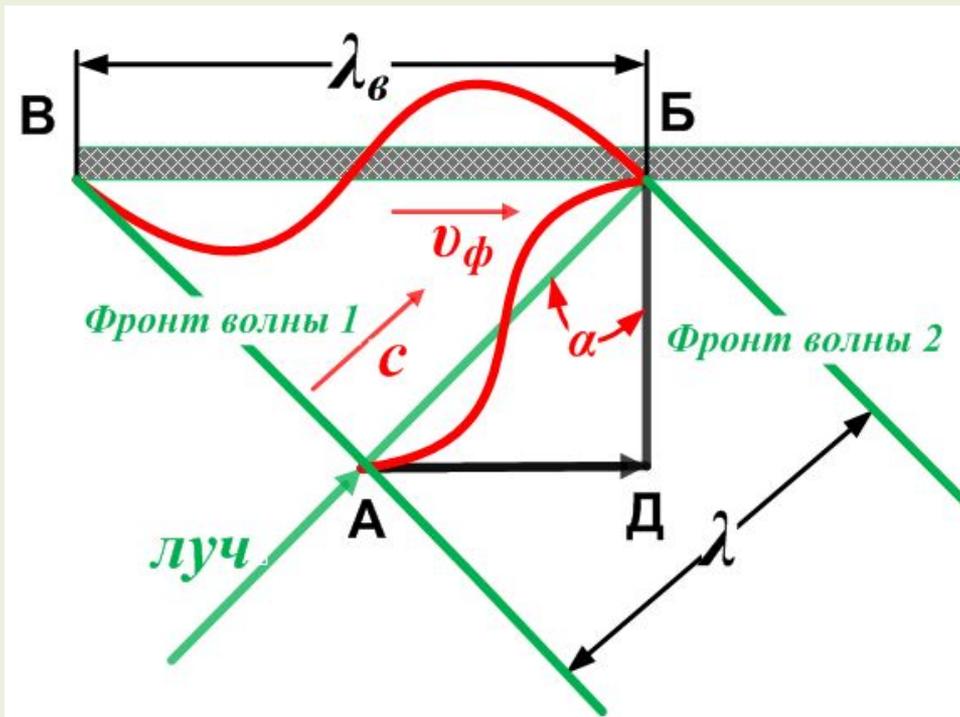
**Фронтом волны**  
называется  
поверхность, во  
всех точках  
которой фаза  
колебаний  
одинакова.

Пока волна проходит расстояние **АБ**, фронт ее перемещается на расстояние **ВБ**

Скорость перемещения фазы волны вдоль волновода называется **фазовой скоростью  $v_{\phi}$** .

Так как **ВБ > АБ** то фазовая скорость оказывается больше скорости распространения волны **c** между стенками волновода.

Из треугольника **АБВ** следует:  **$v_{\phi} = c / \cos(90^{\circ} - \alpha) = c / \sin \alpha$**



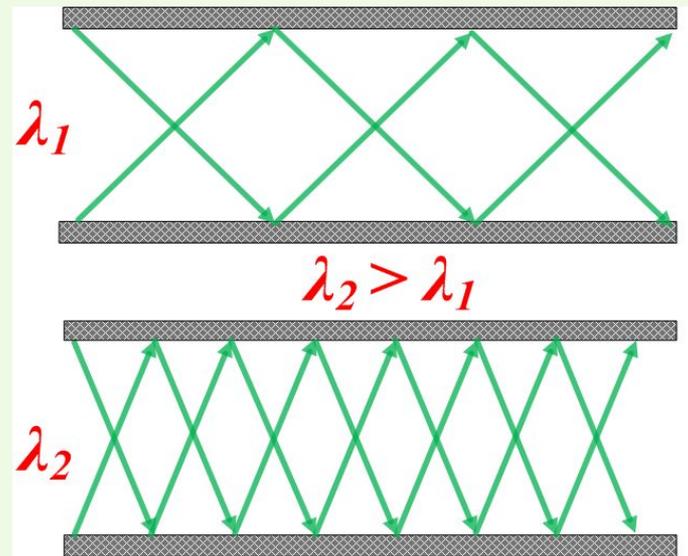
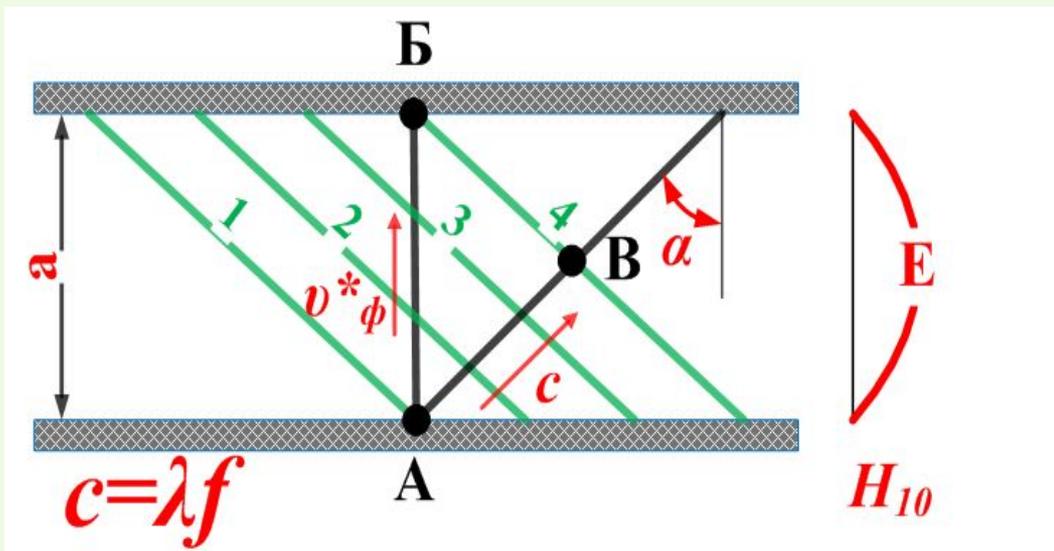
С уменьшением угла  $\alpha$  фазовая скорость увеличивается.

*Длина волны измеренная в направлении вдоль волновода называется длиной волны в волноводе, она больше, чем в свободном пространстве  $\lambda_v > \lambda$ :*

$$\lambda_v = v_\phi T$$

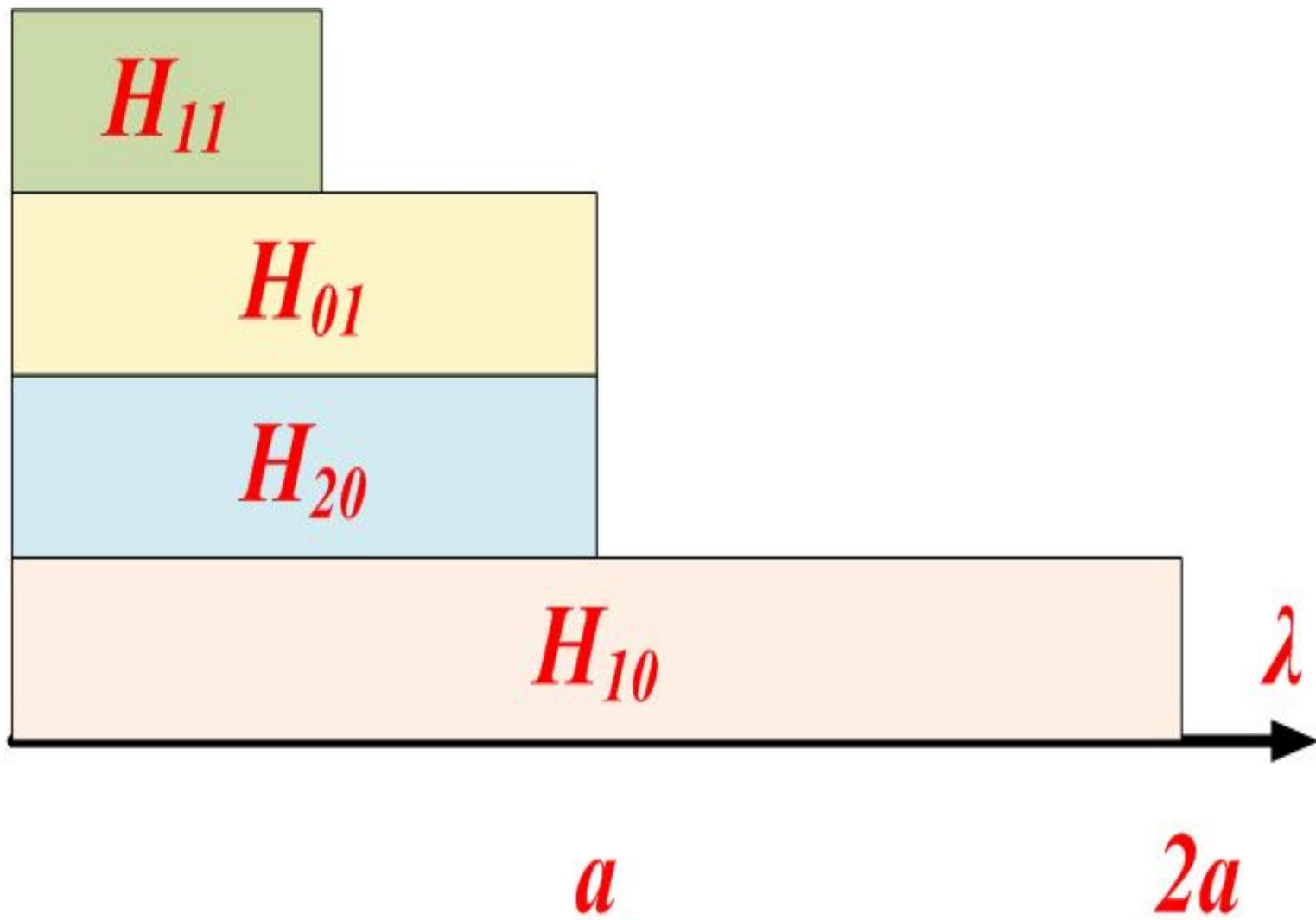
*Перенос энергии вдоль волновода осуществляется группой волн. Поэтому скорость распространения энергии вдоль волновода называют групповой скоростью.* Из треугольника АБД

следует:  $v_{гр} = c \sin \alpha$        $c^2 = v_\phi v_{гр}$



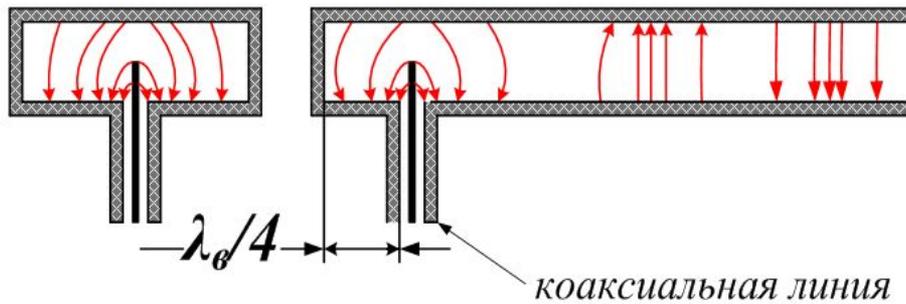
Если уменьшить частоту волн, распространяющихся в волноводе, то длина волны соответственно возрастает и увеличивается расстояние  $AB$ . Так как расстояние  $AB = a = \lambda/2$  остается постоянным, то при удлинении волны точка  $B$  должна приближаться к точке  $B$ , т.е. угол падения волны  $\alpha$  будет уменьшаться, т.о. увеличением  $\lambda$  увеличивается количество «зигзагов» между стенками.

В случае  $\lambda = \lambda_{\text{КРИТ}}$  распространение энергии вдоль волновода прекращается.

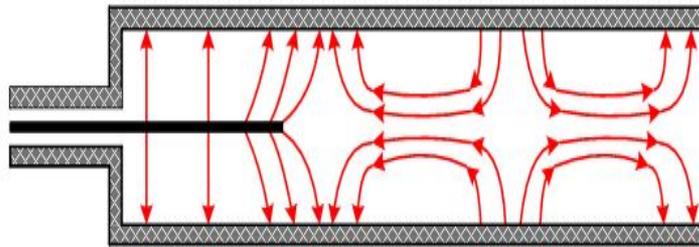


# Связь волноводов с другими цепями (возбуждение волн в волноводе или отбор энергии из волновода)

## Электрическая связь

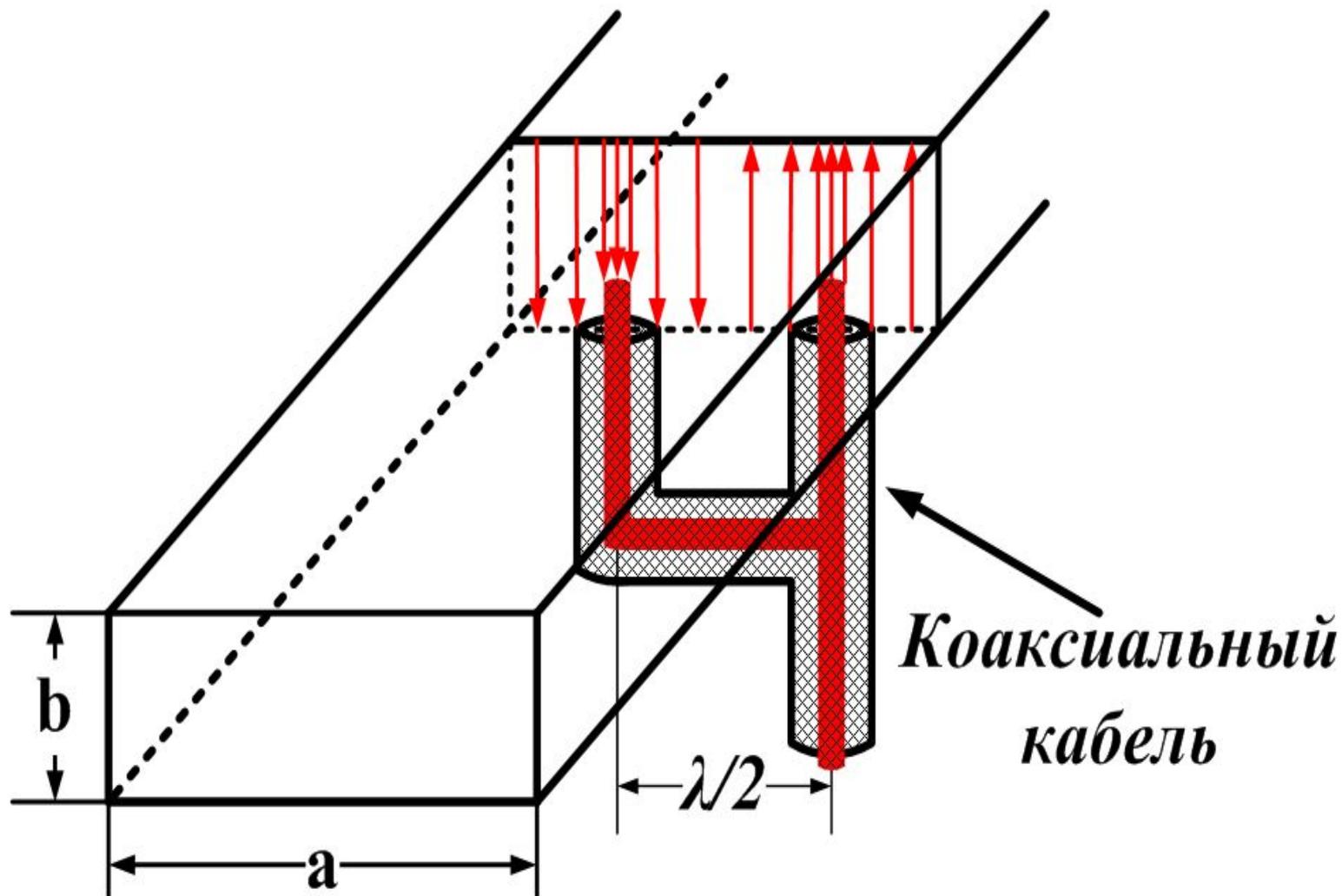


Электрическая связь коаксиальной линии с волноводом для волны  $H_{10}$



Электрическая связь коаксиальной линии с круглым волноводом для волны  $E_{01}$

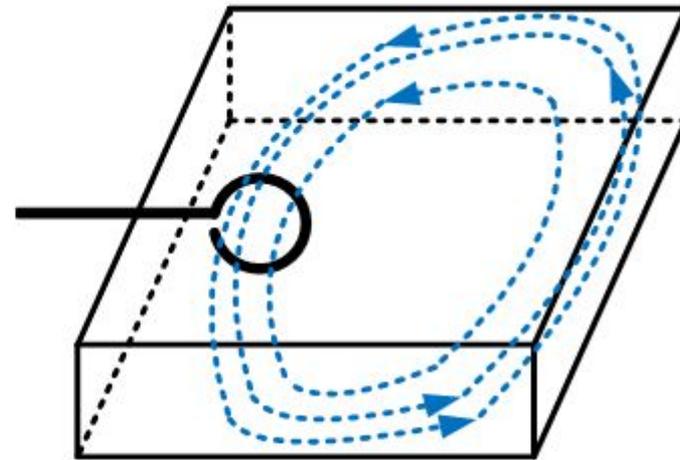
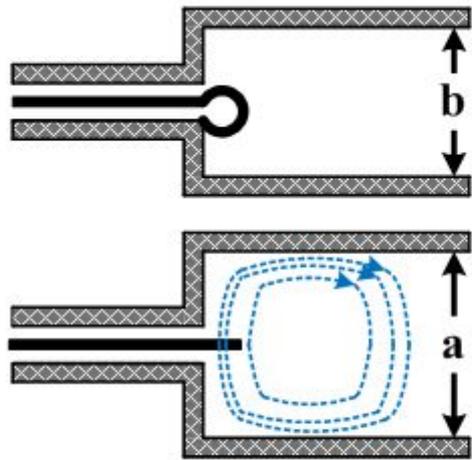
**Электрическая связь осуществляется с помощью штырька (или зонда) установленного внутри волновода вдоль электрических силовых линий, как правило в том месте, где электрическое поле наиболее сильное.**



**Возбуждение волн в волноводе  
двумя вибраторами**

# Магнитная связь

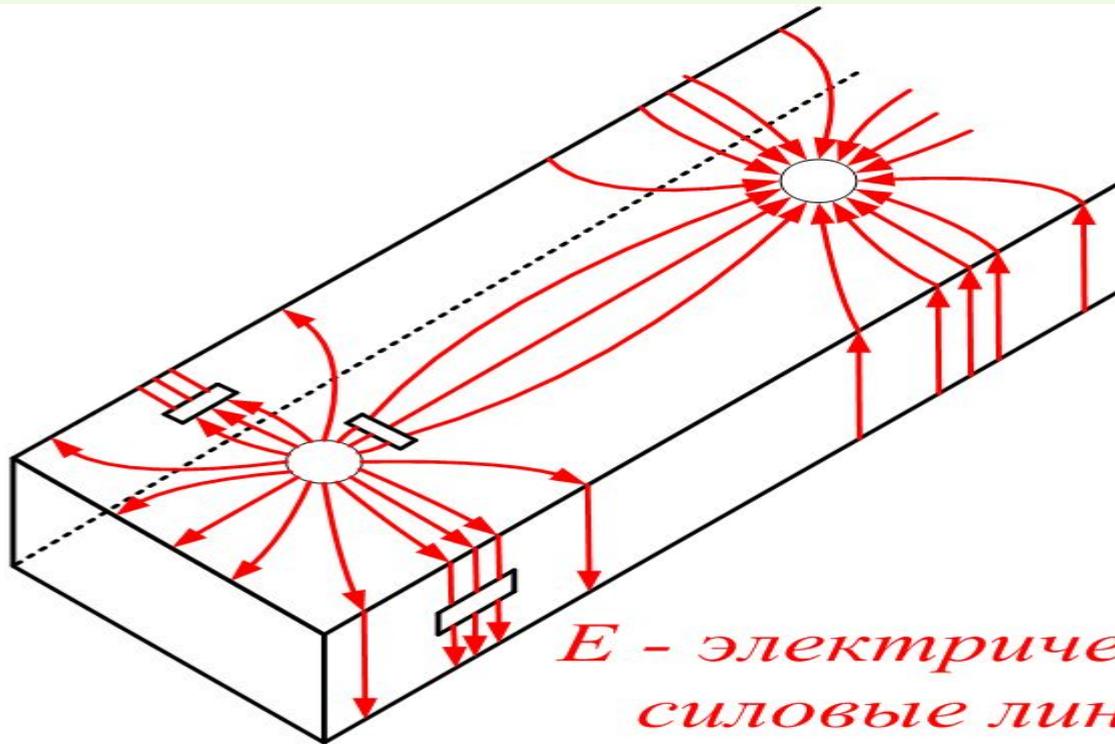
Магнитная связь осуществляется с помощью винта (петли) связи, который обычно располагается в том месте, где магнитное поле наиболее сильно, причем его плоскость перпендикулярна к магнитным силовым линиям. Чем больше размеры витка, тем сильнее связь. (Регулируется связь путем поворота витка).



*Магнитная связь коаксиальной линии с волноводом  
для волны  $H_{10}$*

# Дифракционная СВЯЗЬ

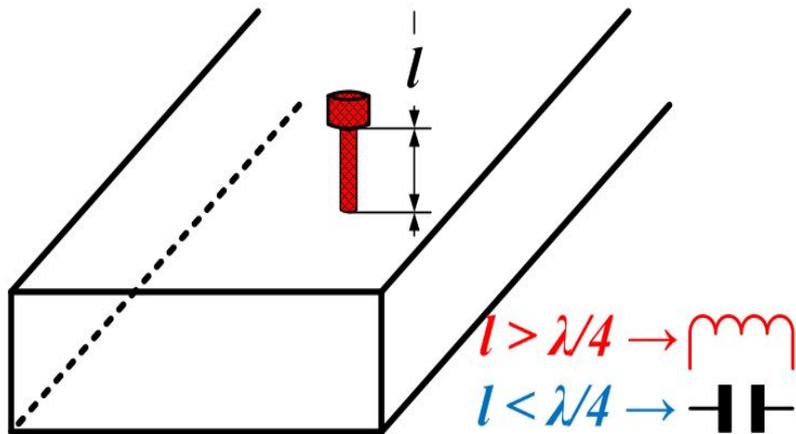
*Щель прорезана в таком месте, где она пересекает линии тока. Электрические силовые линии как бы продолжают линии токов в прорезе. В пространстве, окружающем волновод, они возбуждают электромагнитные колебания.*



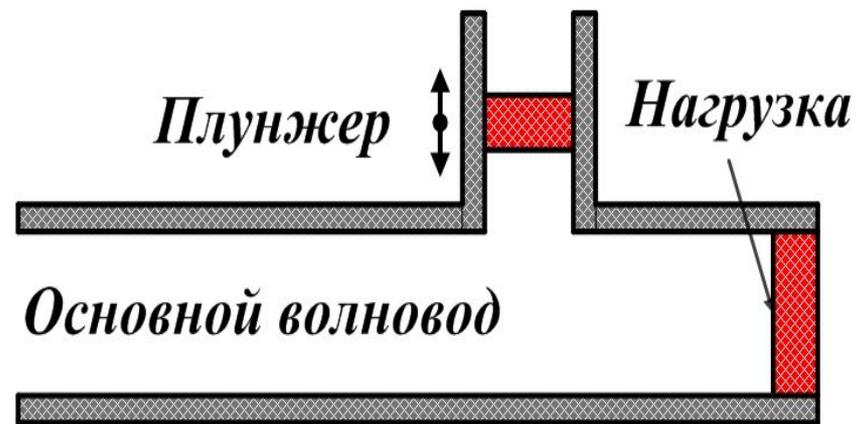
*E - электрические силовые линии*

**Расположение излучающих щелей в волноводе**

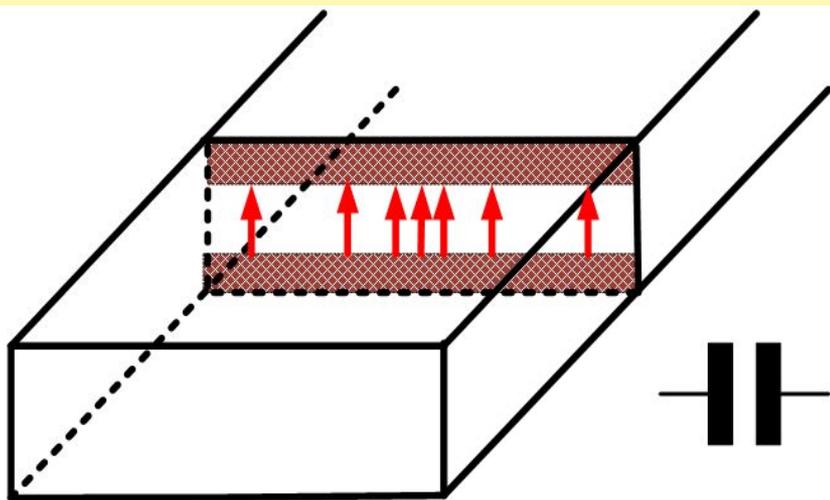
# Согласование волноводов с нагрузкой



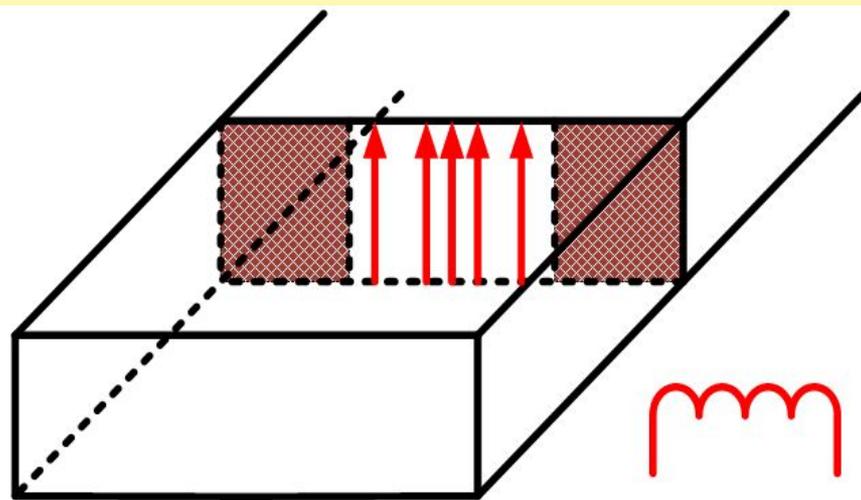
С помощью настроечного винта



Настраивающее ответвление

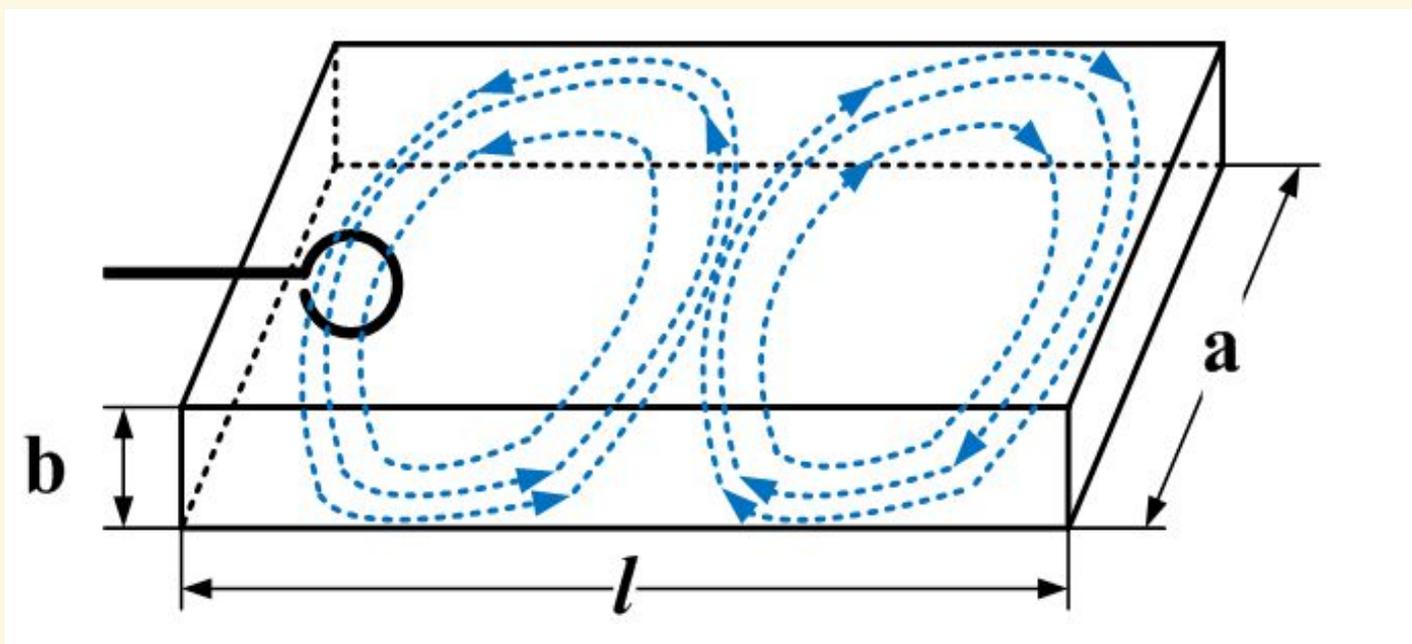


С помощью диафрагм

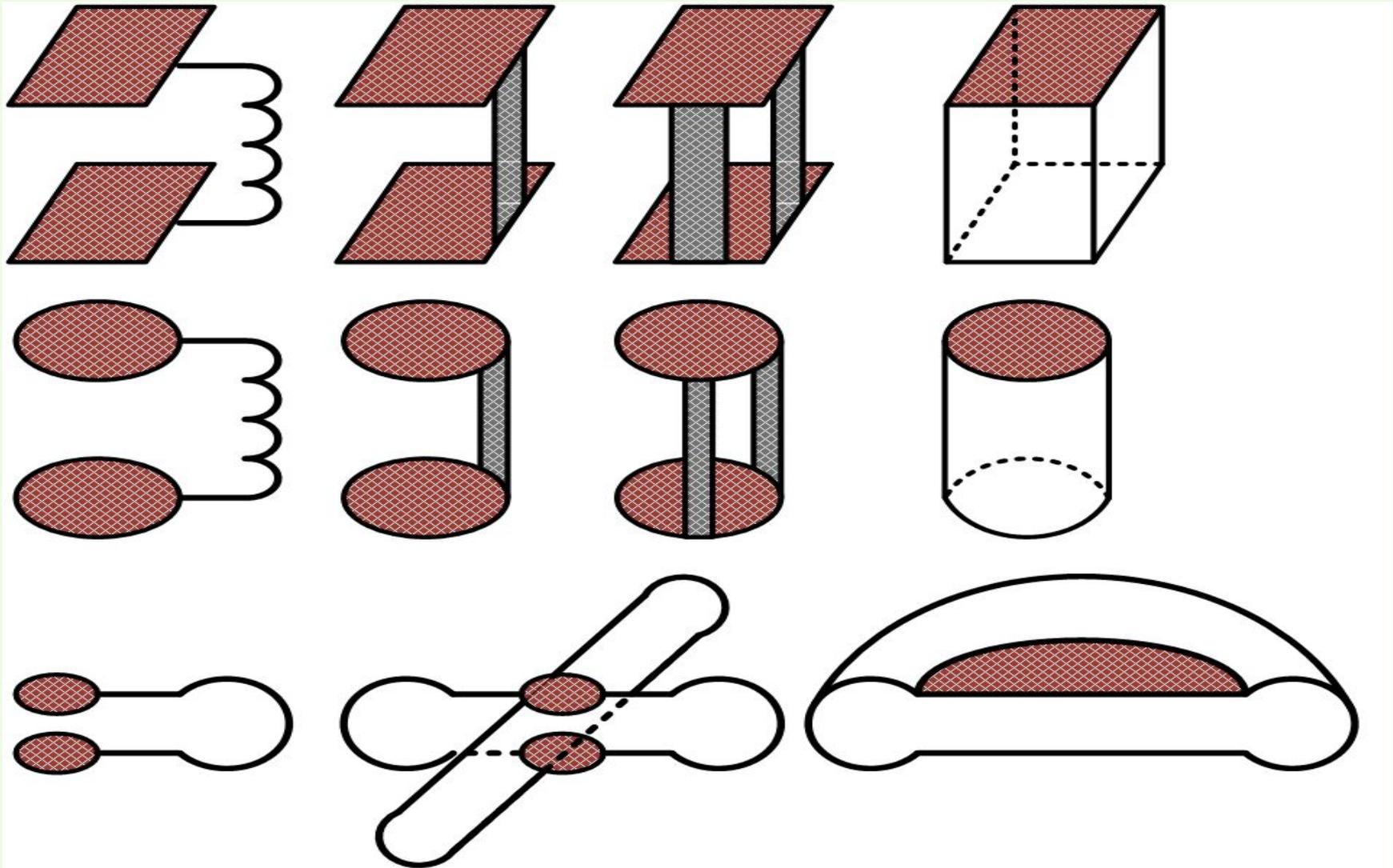


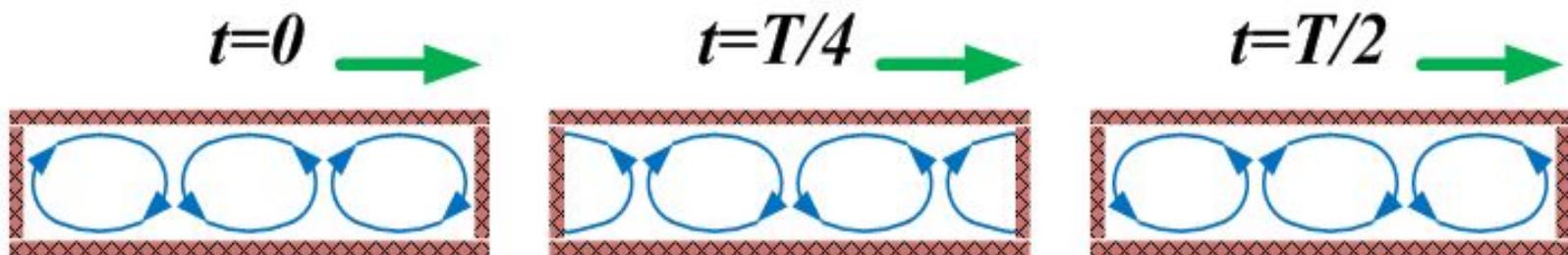
# Объемные резонаторы

*В сантиметровом и дециметровом диапазоне в качестве колебательных контуров используются объемные резонаторы т. к., в колебательных контурах в виде четвертьволновых отрезков длинных линий, с укорочением волны, потери значительно возрастают и применение их становится нецелесообразным. Простейший объемный резонатор - это закрытый отрезок волновода, в котором возбуждаются стоячие волны.*

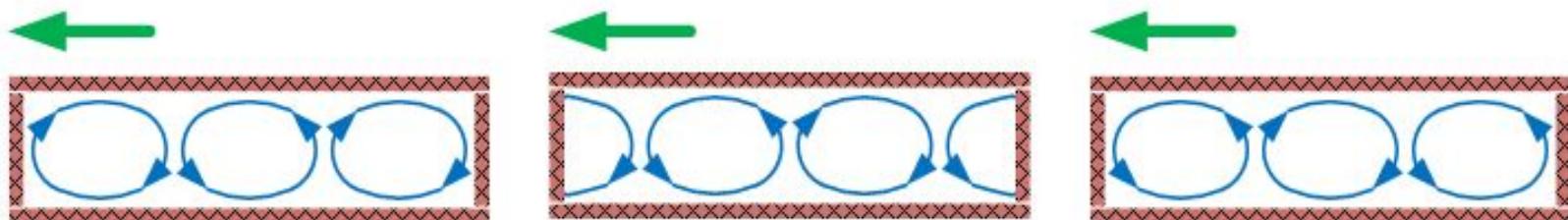


# Переход от обычного контура к объемному резонатору





*Бегущая (падающая) волна*

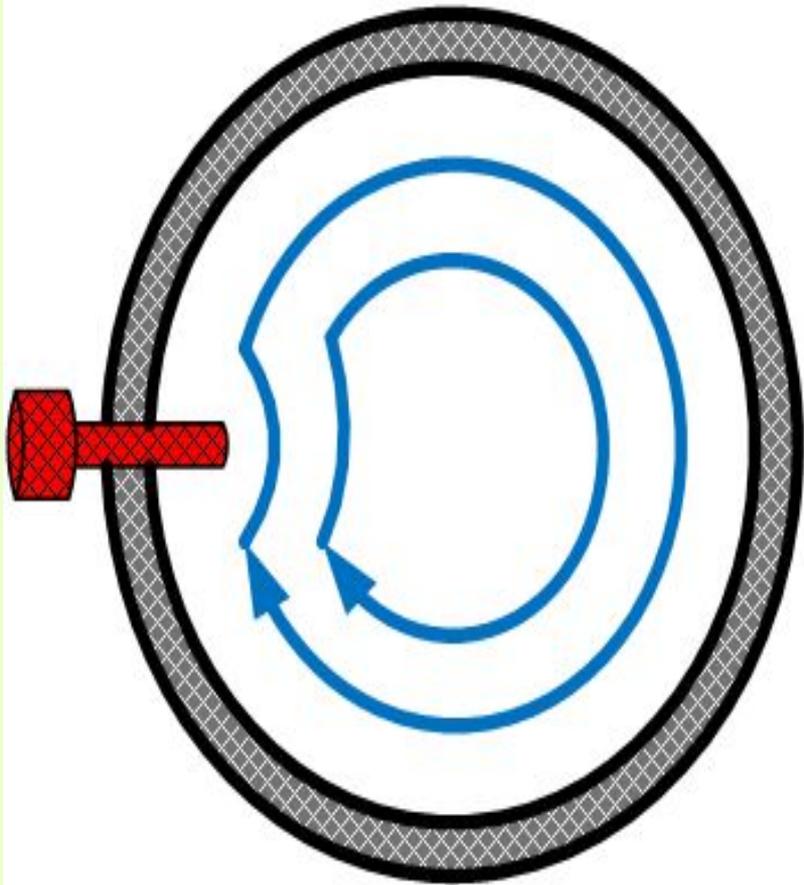


*Бегущая (отраженная) волна*

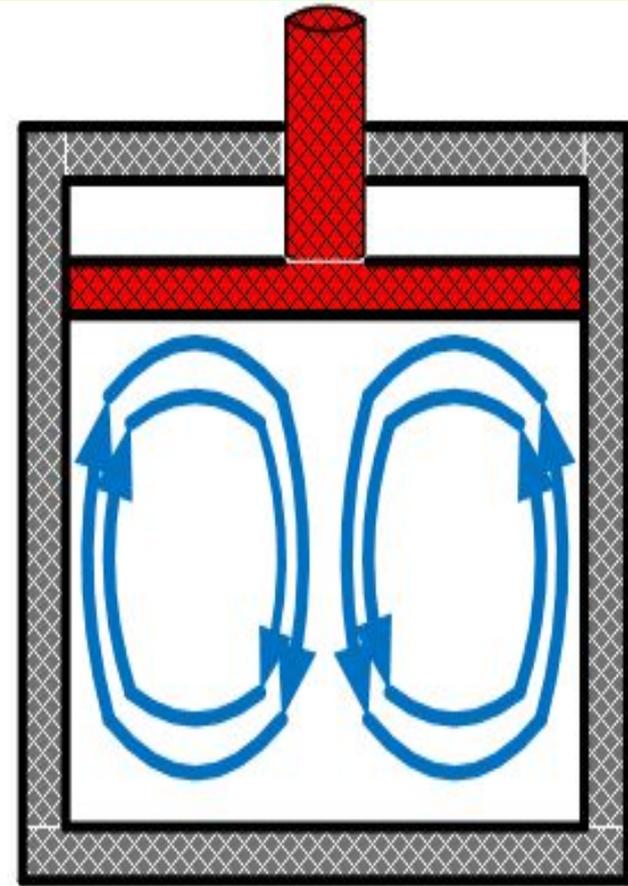


*Стоящая (отраженная) волна*

Образование стоячих волн в объемном резонаторе



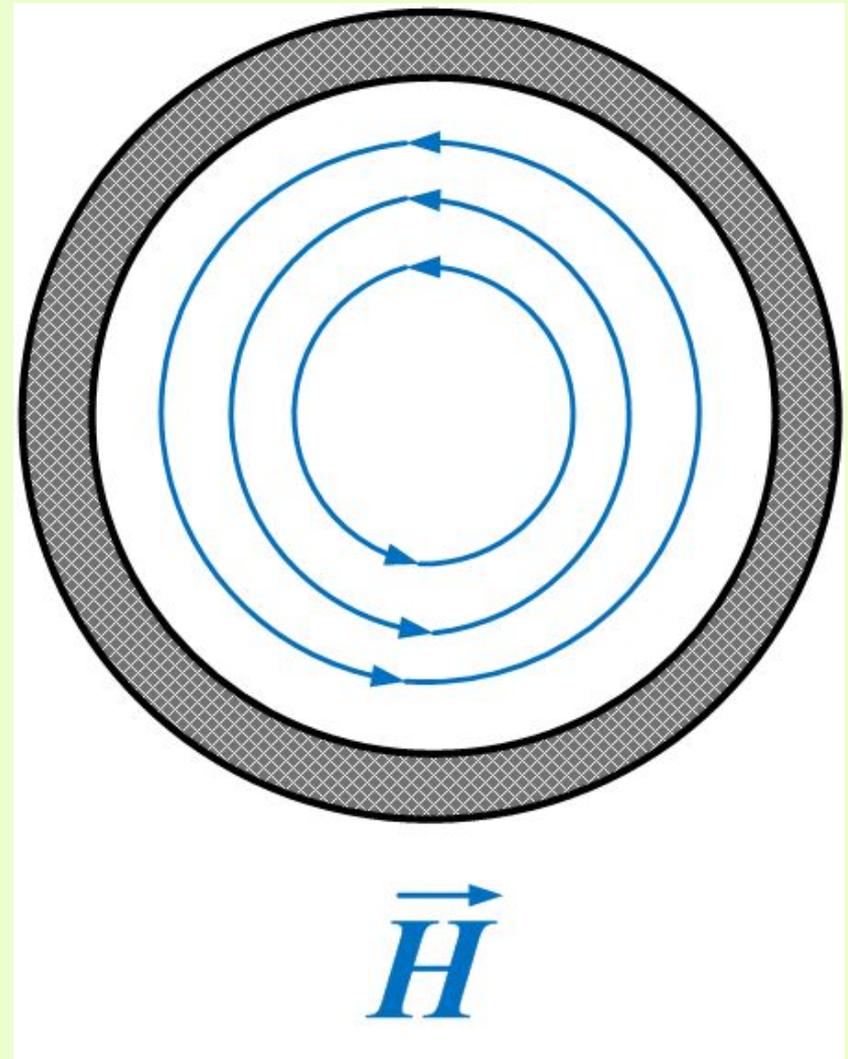
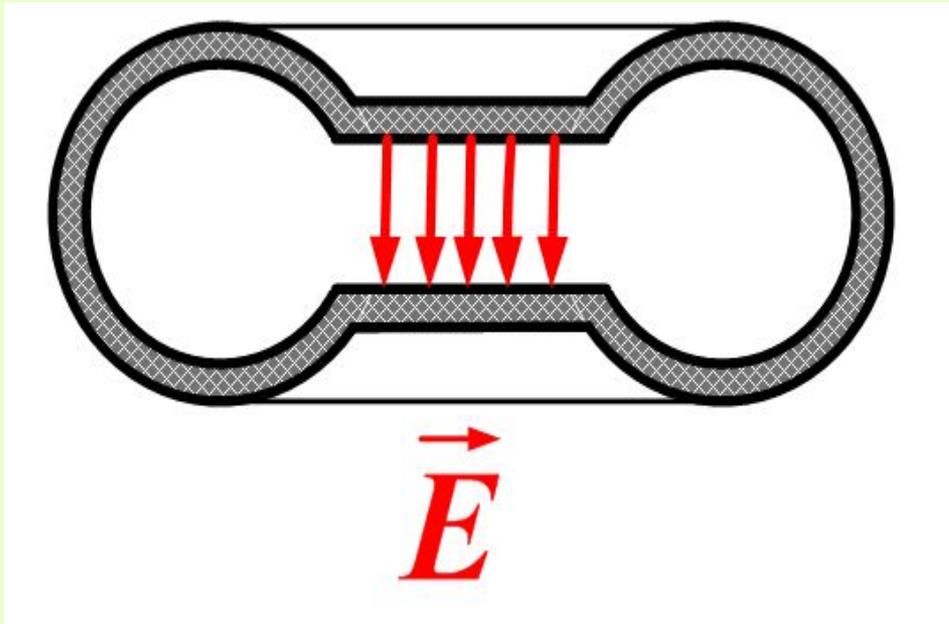
**Винт**



**Плунжер**

Органы перестройки объемных резонаторов

# Тороидальный резонатор



## **Задание на самоподготовку:**

- 1. Изучить материал по конспекту лекций.**
- 2. [1] С. 263 – 266, 324 – 330;  
[2] С. 67 – 69.**