

## Тема 2. Электромагнитные волны в направляющих системах

### Лекция 13. Энергетические характеристики волноводов

#### 1. Предельная и допустимая рабочая мощность, и их зависимость от режимов работы волновода. Способы повышения электрической прочности волноводов

К основным энергетическим характеристикам волновода относятся: предельная и допустимая рабочая мощность, коэффициент затухания, затухание и коэффициент полезного действия. Рассмотрим каждую из них.

Мощность, передаваемая по волноводу, определяется амплитудами напряженностей электрического и магнитного полей. Согласно теореме Умова-Пойнтинга:

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_S \left[ \vec{E} \times \vec{H}^* \right]_z ds, \quad (1)$$

где  $\vec{H}^*$  - комплексно сопряженная амплитуда напряженности магнитного поля.

Применим это выражение к волноводу прямоугольного сечения, для чего векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  нужно разложить по ортам прямоугольной системы координат и подставить в уравнение (1). При этом нужно учесть, что в переносе энергии по волноводу участвуют только поперечные составляющие поля. В результате получим

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_0^a \int_0^b \left( E_x H_y^* - E_y H_x^* \right) dx dy. \quad (2)$$

В качестве примера найдем мощность, передаваемую волной по прямоугольному волноводу. Для этого вначале подставим  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$  и  $H_y$  из системы уравнений для составляющих поля волны типа  $H_{10}$  в выражение (2) и получим

$$\begin{aligned} E_y &= -D\omega \frac{\pi}{a} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right), \\ H_x &= D \frac{\beta}{\mu_a} \frac{\pi}{a} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right), \\ H_y &= E_x = 0 \end{aligned}$$

Подставив эти уравнения в формулу (2), получим

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint_{00}^{ab} D^2 \frac{\omega \beta}{\mu_a} \frac{\pi^2}{a^2} \sin^2 \left( \frac{\pi}{a} x \right) dx dy = D^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{b}{a} \frac{\omega \beta}{\mu_a}. \quad (3)$$

Из этого выражения найдем постоянную интегрирования  $D$ , характеризующую амплитуду электромагнитного поля

$$D = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{a \mu_a}{b \omega \beta} P}. \quad (4)$$

Используя найденную константу, теперь можно получить окончательные выражения для нахождения всех составляющих напряженностей поля в прямоугольном волноводе, в том числе и для волны типа  $H_{10}$ . Например,

$$E_y = -D \frac{\omega \pi}{a} \sin \left( \frac{\pi x}{a} \right) = -E_m \sin \left( \frac{\pi x}{a} \right), \quad (5)$$

где

$$E_m = D \frac{\omega \pi}{a} = 2 \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{\beta} \frac{P}{ab}}.$$

В случае вакуумного заполнения волновода амплитуда напряженности электрического поля вычисляется по формуле

$$E_m = 2 \sqrt{\frac{P}{ab}} \frac{4 \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}}{4 \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{kp}} \right)^2}}. \quad (6)$$

Третий множитель формулы - корень квадратный из волнового сопротивления волновода  $\sqrt{Z_{сн}}$ . С учетом этого выражение (6) приобретает вид

$$E_m = 2 \sqrt{\frac{P Z_{сн}}{ab}}.$$

Решив его относительно  $P$ , найдем мощность, передаваемую по волноводу:

$$P = \frac{1}{4} \frac{E_m^2}{Z_{сн}} ab. \quad (7)$$

Из полученного выражения видно, что мощность, передаваемая по волноводу, пропорциональна квадрату напряженности электрического поля и размерам поперечного сечения.

Поскольку размеры  $a$  и  $b$  рассчитываются, исходя из необходимости существования в волноводе только волны основного типа, мощность определяется, в основном, квадратом напряженности электрического поля.

В свою очередь, напряженность  $E$  нельзя увеличивать бесконечно, поскольку при достижении некоторого предельного значения наступит электрический пробой волновода. Он происходит в области наибольшей напряженности электрического поля. Пробой, при давлении близком к атмосферному, имеет вид искрового разряда и обычно сопровождается сильным звуковым хлопком и выделением тепловой энергии, что приводит к плавлению волновода. В случае понижения давления пробой сходен с тлеющим разрядом.

Предельной называется наибольшая мощность, которая передается по волноводу без электрического пробоя.

Предельная напряженность электрического поля  $E_{пред}$ , при котором в сухом воздухе наступает пробой, составляет в диапазоне сантиметровых волн 30 кВ/см. Тогда

$$P_{пред} = \frac{1}{4} \frac{E_{пред}^2}{Z_{сн}} ab. \quad (8)$$

Для воздушного наполнения

$$Z_{сн} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2}} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2}}. \quad (9)$$

Если в выражение (9) подставить формулу (8) и числовые значения  $E_{пред}$  и  $Z_0$  получим

$$(P_{пред})_{H_{10}} = \frac{E_{пред}^2}{4Z_0} ab \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2} = 597 ab \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2}. \quad (10)$$

В этом выражении числовой коэффициент выбран таким образом, что  $P_{пред}$  получается в киловаттах, если размеры  $a$  и  $b$  подставить в сантиметрах.

Точно также получаются выражения для определения различных типов волн в различных волноводах. Для круглого волновода:

$$(P_{пред})_{H_{11}} = 1790 R^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2}; \quad (11)$$

$$(P_{пред})_{H_{01}} = 1805 R^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2}. \quad (12)$$

Для коаксиального волновода:

$$\left(P_{пред}\right)_{ТЕМ} = 1870 d^2 \ln\left(\frac{D}{d}\right). \quad (13)$$

Полученные формулы не учитывают возможных неоднородностей, приводящих к локальному повышению  $E_m$  и облегчающих наступление пробоя.

При возникновении стоячей волны  $P_{пред}$  оказывается меньше расчетной, так как в результате интерференции падающей и отраженной волн величина  $E_m$  практически удваивается, что снижает электрическую прочность волновода.

Поскольку на практике наиболее распространенным режимом является режим смешанных волн, допустимая рабочая мощность, передаваемая по волноводу, принимается с необходимым запасом и составляет 20-30% от рассчитанной предельной мощности.

Выясним, как зависит передаваемая по волноводу мощность от режима его работы? Для этого рассмотрим режим смешанных волн, когда присутствуют падающая и отраженная волны.

$$P = P_{пад} - P_{отр} = \left( \frac{E_{m\text{ пад}}^2}{4Z_{сн}} - \frac{E_{m\text{ отр}}^2}{4Z_{сн}} \right) ab = (E_{m\text{ пад}}^2 - E_{m\text{ отр}}^2) \frac{ab}{4Z_{сн}}. \quad (14)$$

Выражение в скобках представим в виде

$$(E_{m\text{ пад}}^2 - E_{m\text{ отр}}^2) = (E_{m\text{ пад}} + E_{m\text{ отр}})(E_{m\text{ пад}} - E_{m\text{ отр}}) = E_{\text{макс}} E_{\text{мин}}.$$

и подставим в уравнение (14)

$$P = \frac{E_{\text{макс}} E_{\text{мин}}}{4Z_{сн}} ab.$$

Умножив числитель и знаменатель на  $E_{\text{макс}}$ , и учитывая, что

$$K_c = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{мин}}},$$

получим

$$P = \frac{E_{\text{макс}}^2}{4Z_c K_c} ab. \quad (15)$$

Из уравнения (15) следует, что в режиме бегущей волны ( $K_c=1$ ) передаваемая мощность принимает максимальное значение.

При стоячей волне передача мощности не происходит  $K_c=\infty$ ,  $P=0$ .

Для прямоугольного волновода МЭК-100 с размерами сечения 22,86x10,16 мм при длине волны  $\lambda=3,2$  см предельная мощность составляет

$$\left(P_{пред}\right)_{H_{10}} = 987 \text{ кВт}.$$

В современных РЛС передаваемые мощности составляют несколько мегаватт, поэтому возникает необходимость повышения электрической прочности волноводов.

Рассмотрим некоторые из них.

1. Из формулы (15) следует, что с увеличением размеров поперечного сечения волновода предельная мощность увеличивается, однако возникают высшие типы волн. Поэтому данный способ на практике не применяется.

2. Введение в волновод диэлектриков, у которых  $E_{пред}$  выше, чем у воздуха, позволяет существенно повысить электрическую прочность. Но это, в свою очередь, приводит к ряду негативных явлений:

- а) сильному нагреву диэлектрика за счет диэлектрических потерь;
- б) возникновению опасности пробоя при наличии зазоров между металлом и диэлектриком;
- в) трудности согласования температурных коэффициентов расширения диэлектрика и металла.

Исходя из этого, твердые диэлектрики для наполнения волноводов применяют в исключительных случаях.

Использование жидких диэлектриков имеет ряд достоинств, заключающихся в идеальном заполнении и хорошем охлаждении волновода. Однако при этом имеются и недостатки, связанные с устранением течей в местах соединений волноводов и наличием пороговых напряженностей, при которых резко возрастают потери.

Применение газообразных диэлектриков, например, эле газа ( $SF_6$  - шести фтористой серы) позволяет увеличивать  $E_{пред}$  в три раза, а  $P_{пред}$  - приблизительно на порядок.

Этот способ достаточно часто используется в современных радиолокационных станциях. Единственный недостаток его заключается в необходимости всегда иметь запас газа.

Наполнение волноводной системы сжатым воздухом позволяет повысить  $P_{пред}$ . В частности, если увеличить давление до трех атмосфер, предельная мощность возрастет в пять раз, при повышении давления в четыре раза -  $P_{пред}$  увеличивается в восемь раз.

Достоинство последнего способа заключается в простоте, поскольку избыточное давление можно создать с помощью компрессора, входящего в состав аппаратуры РЛС.

К недостаткам следует отнести необходимость увеличения механической прочности стенок волновода.

#### **Выводы:**

- 1.) Предельная мощность, передаваемая по волноводу, возрастает при увеличении размеров волновода и уменьшается с увеличением длины волны.
- 2.) Применение газообразных диэлектриков позволяет увеличивать  $E_{пред}$  в три раза, а  $P_{пред}$  - приблизительно на порядок.

## 2. Учет потерь энергии в стенках волновода

При передаче энергии по волноводу имеют место потери мощности за счет конечного сопротивления металла, из которого он изготовлен. Потерями в диэлектрике (в воздухе) можно пренебречь ввиду их малости.

Теоретически строго определить потери в волноводах трудно в связи с необходимостью учета новых граничных условий. По этой причине обычно пользуются приближенным методом оценки потерь, сущность которого состоит в следующем:

1) отыскивается решение краевой задачи (получаются уравнения поля и находятся величины токов в стенках) без учета потерь;

2) делается предположение, что потери не изменяют структуру поля и величин токов в стенках волноводов;

3) используя токи, найденные в предположении об отсутствии потерь, вычисляются джоулевы потери при конечной проводимости стенок.

Учитывая высокую проводимость стенок реальных волноводов (медь, серебро, алюминий), структуру поля приближенно считают такой же, как и в случае идеально проводящих стенок. Реально в волноводах появляется весьма малая касательная составляющая  $\vec{E}$  вектора и нормальная составляющая вектора  $\vec{H}$  на поверхности стенок.

За счет протекания токов в стенках волновода тепловые потери будут иметь место. Но на расстоянии длины волны в волноводе они будут незначительными по сравнению с передаваемой мощностью, поэтому можно считать, что структура поля практически остается неизменной в сравнении с идеальным волноводом.

Доказательство сходимости результатов при сделанных предположениях впервые проведено С.М.Рытовым в 1940 году.

При наличии потерь  $\gamma = \beta + i\alpha$  напряженность электрического поля в волноводе изменяется по закону:

$$\vec{E} = \vec{E} e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)}. \quad (16)$$

Найдем коэффициент затухания  $\alpha$ , руководствуясь следующими соображениями. При длине волновода, равной одному метру, напряженность поля уменьшается в  $e^\alpha$  раз, а мощность, пропорциональная квадрату напряженности, уменьшается в  $e^{2\alpha}$  раз. Следовательно, мощность, поглощаемая в стенках на единице длины волновода, равна

$$P_{nom1} = P(1 - e^{-2\alpha}),$$

где  $P_{nom1}$  - мощность потерь в волноводе единичной длины;

$P$  - мощность, поступающая на вход волновода.

Отсюда

$$e^{-2\alpha} = 1 - \frac{P_{nom1}}{P}.$$

Обычно потери в волноводе невелики и можно допустить, что

$$\frac{P_{nom1}}{P} \ll 1.$$

Раскладывая  $e^{2\alpha}$  в ряд по малому параметру и используя два первых члена разложения, получим

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{P_{nom1}}{P}. \quad (17)$$

Таким образом, вычислив  $P_{nom1}$ , рассеиваемую в стенках волновода при длине 1 метр, и  $P$  по известной формуле:

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_s [\vec{E} \times \vec{H}^*] ds, \quad (18)$$

можно определить  $\alpha$ .

Рассмотрим участок стенки волновода (рис. 1). Найдем **активное сопротивление слоя** единичной длины шириной  $dl$  и толщиной  $\delta$  ( $\delta$  - глубина проникновения токов в металл).

$$R_s = \frac{1}{\sigma_{cm}} \frac{1}{\delta dl}, \quad (19)$$

где  $R_s$  - активное сопротивление слоя;

$\sigma_{cm}$  - удельная проводимость стенок.

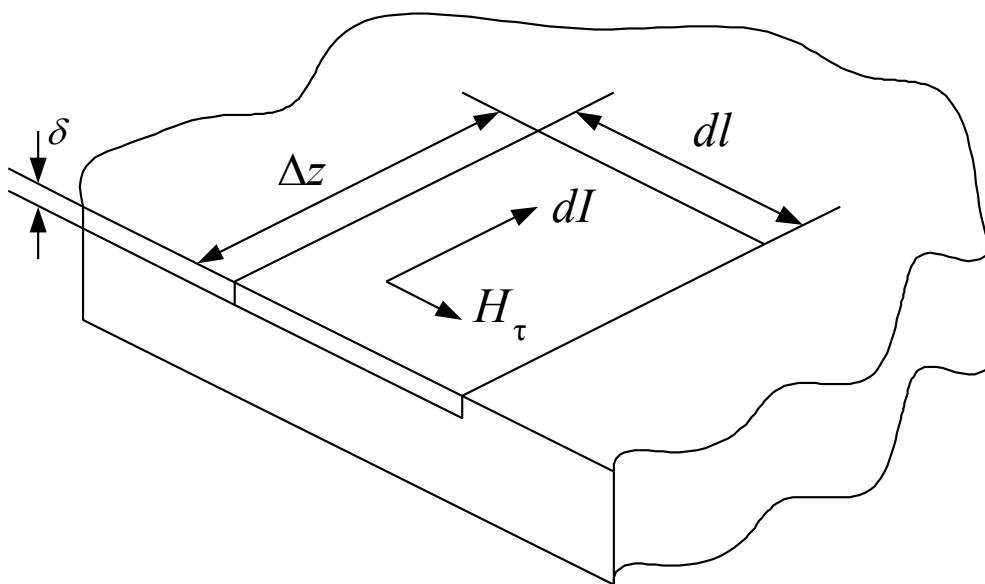


Рис. 1

Найдем мощность потерь в рассматриваемом элементе стенки при амплитуде тока  $dI$ .

$$dP_{nom1} = \frac{1}{2} \frac{(dI)^2}{\sigma_{cm} \delta dl}, \quad (20)$$

$$dP_{nom1} = \frac{1}{2} dI^2 R_s.$$

Величина  $dI$  связана с плотностью поверхностного тока соотношением

$$dI = |j_{нов}| dl.$$

Переходя от  $dI$  к плотности поверхностного тока и интегрируя выражение (19) по периметру волновода при длине, равной  $l$  м, получим

$$P_{ном1} = \oint \frac{1}{2} \frac{|j_{нов}|^2 dl}{\sigma_{см} \delta} = \frac{1}{2} R_{нов} \oint |j_{нов}|^2 dl,$$

где

$$R_s = \frac{1}{\sigma_{см} \delta} = \sqrt{\frac{\omega \mu_{см} \mu_0}{2 \sigma_{см}}}.$$

Это выражение получено с учетом уравнения поверхностного эффекта:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_{см} \mu_0 \sigma_{см}}}.$$

Плотность поверхностного тока численно равна касательной составляющей напряженности магнитного поля  $\vec{H}_\tau$  у поверхности стенки волновода:

$$|j_{нов}| = |\vec{H}_\tau|.$$

С учетом этого равенства получим

$$P_{ном1} = \frac{1}{2} R_{нов} \oint |\vec{H}_\tau|^2 dl. \quad (21)$$

Величина  $H_\tau$  определяется из уравнений составляющих поля рассматриваемого типа волны.

Полученные выражения (21) и (18) подставим в уравнение (17). В результате получим формулу для вычисления коэффициента затухания в волноводе

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2} R_{нов} \oint |\vec{H}_\tau|^2 dl}{2 \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_S [\vec{E} \times \vec{H}^*] ds}. \quad (22)$$

#### Выводы:

- 1.) Коэффициент затухания зависит от частоты СВЧ колебаний, от удельной проводимости стенки волновода, от структуры поверхностных токов, от неровности стенок.
- 2.) Коэффициент затухания не зависит от мощности.



### 3. Единицы измерения потерь энергии в волноводах. Потери в волноводах прямоугольного и круглого сечений

При инженерных расчетах не всегда удобно пользоваться коэффициентом затухания, поэтому применяют другой параметр - затухание. Пусть в волноводе распространяется волна, характеризуемая величинами  $E_{вх}$ ,  $P_{вх}$  на входе, и  $E_{вых}$ ,  $P_{вых}$  на выходе. Они связаны между собой соотношениями:

$$|E_{вых}| = |E_{вх}| e^{-\alpha z}; \quad (23)$$

$$P_{вых} = P_{вх} e^{-2\alpha z}. \quad (24)$$

Исходя из этих выражений, определим затухание следующим образом:

$$L = \lg \frac{P_{вх}}{P_{вых}} [B].$$

При потерях в 1 бел (Б) мощность на выходе линии по сравнению с входом уменьшится в 10 раз. Эта единица измерения крупная, поэтому вводят другую, в 10 раз меньшую - децибел (дБ).

$$L = 10 \lg \frac{P_{вх}}{P_{вых}} = 20 \lg \frac{|E_{вх}|}{|E_{вых}|} = 10 \lg e^{2\alpha z} [\partial B]. \quad (25)$$

**Затухание** связано с **коэффициентом затухания** приближенной зависимостью:

$$L = 8.68 \alpha z [\partial B], \quad (26)$$

где  $z$  - длина линии.

В последнем выражении коэффициент затухания  $\alpha$  должен выражаться в  $\partial B/м$ , в то время как в уравнении (22) в  $1/м$ .

Необходимо помнить следующие соотношения:

3  $\partial B$  соответствует изменению в 2 раза,

6  $\partial B$  " в 4 раза,

10  $\partial B$  " в 10 раз,

20  $\partial B$  " в 100 раз и т. д.

С помощью выражения (25) можно получить формулы для расчета коэффициентов затухания в различных волноводах. Для этого необходимо в указанное выражение подставить уравнения для составляющих поля соответствующего типа волны.

Например, для прямоугольного волновода, в котором распространяется волна основного типа, коэффициент затухания рассчитывается с помощью выражения

$$|\alpha|_{H_{10}} = \frac{\sqrt{\frac{\omega \mu_{cm} \varepsilon \varepsilon_0}{2 \sigma_{cm} \mu}}}{b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \left[ 1 - 2 \frac{b}{a} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2 \right].$$

На практике волноводы изготавливают из неферромагнитного материала ( $\mu=1$ ). В этом случае  $\varepsilon=\mu=1$ , а  $(\lambda_{кр})_{H10}=2a$ . Уравнение для расчета  $(\alpha)_{H10}$  примет вид

$$|\alpha|_{H_{10}} = \frac{\sqrt{\frac{\omega \varepsilon_0}{2 \sigma_{cm}}}}{b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \left[ 1 - 2 \frac{b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \right]; \quad (27)$$

для типа  $H_{mn}$  в прямоугольном волноводе ( $n \geq 1$ )

$$\alpha_m = \frac{2R_s}{Z_0 b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2\lambda_{кр}}\right)^2}} \left\{ \left(1 + \frac{b}{a}\right) \left(\frac{\lambda_0}{2\lambda_{кр}}\right)^2 + \left(1 - \left(\frac{\lambda_0}{2\lambda_{кр}}\right)^2\right) \frac{\frac{b}{a} \left(\frac{b}{a} n^2 + m^2\right)}{\frac{b^2 n^2}{a^2} + m^2} \right\},$$

для волн типа  $E_{mn}$  в прямоугольном волноводе

$$\alpha_m = \frac{2R_s \left(\left(\frac{b}{a}\right)^3 n^2 + m^2\right)}{Z_0 b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2\lambda_{кр}}\right)^2 \left(\frac{b^2 n^2}{a^2} + m^2\right)}},$$

Для круглых волноводов из немагнитного металла, в которых распространяются волны  $H_{11}$  и  $H_{01}$ , в случае  $\varepsilon=\mu=1$ :

$$|\alpha|_{H_{11}} = \frac{\sqrt{\frac{\omega \varepsilon_0}{2\sigma_{cm}}}}{R \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \left[ 0.42 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2 \right]; \quad (28)$$

$$|\alpha|_{H_{01}} = \frac{\sqrt{\frac{\omega \varepsilon_0}{2\sigma_{cm}}}}{R \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2, \quad (29)$$

где  $\sigma_{cm}$  - удельная объемная проводимость материала стенок.

Расчетные формулы получены в предположении, что волновод имеет воздушное заполнение. Если волновод заполнен диэлектриком, то в эти формулы вместо  $\lambda_0$  следует подставлять значение длины волны в диэлектрике  $\lambda_0 / \sqrt{\varepsilon}$ .

Для расчета коэффициента ослабления за счет потерь в диэлектрике вместо  $\varepsilon$  следует подставить комплексную проницаемость диэлектрика  $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon (1 - j \operatorname{tg} \delta_3)$

В результате получим  $\alpha_D = \operatorname{Im} \left[ \sqrt{\beta^2 \varepsilon (1 - j \operatorname{tg} \delta_3) - g^2} \right].$

(  
При условии  $\operatorname{tg} \delta_3 \ll 1$  формула может быть упрощена:

$$\alpha_D \approx \frac{\beta^2 \varepsilon \operatorname{tg} \delta_3}{2h},$$

$$\alpha_D \approx \frac{\pi \varepsilon \operatorname{tg} \delta_3}{\lambda_0 \sqrt{1 - \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}},$$

где  $\beta = 2\pi/\lambda_0$ ;  $g = 2\pi/\lambda_{кр}$  — поперечное волновое число, продольное волновое число  $h = \sqrt{\beta^2 \varepsilon - g^2}$ .

Величина коэффициента затухания, вычисленная с использованием формул (27 - 29), составляет для медных волноводов в диапазоне дециметровых волн 0,005 - 0,015 **дБ/м**, в сантиметровом диапазоне - 0,015 - 0,6 **дБ/м**, в миллиметровом диапазоне волн - 0,6-10 **дБ/м**.

Из этого сравнения следует, что наименьшими потерями обладают волноводы в дециметровом диапазоне, но при этом размеры поперечного сечения и их масса весьма велики.

Для сравнения, коэффициент затухания в коаксиальном волноводе РК-75 с полиэтиленовым наполнением в дециметровом диапазоне составляет 0,8 дБ/м.

Проведенное сравнение позволяет сделать вывод о том, что полый волновод обладает меньшими потерями, чем коаксиальный, но последний имеет меньшие габариты.

Затухание существенно зависит от неровности стенок. Поэтому они обрабатываются по 8-10 классу чистоты поверхности.

Изученные волноводные линии передачи СВЧ-энергии являются основными элементами высокочастотной части РЛС. На их основе создаются различные устройства, с помощью которых над сигналами производятся алгебраические и логические операции.

Волноводы и устройства, созданные на их основе, обладают существенным недостатком - они имеют большие габариты и массу. Для построения малогабаритной аппаратуры в настоящее время стали применяться полосковые волноводы.

**Выводы:**

- 1.) Наименьшими потерями обладают волноводы в дециметровом диапазоне, но при этом размеры поперечного сечения и их масса весьма велики.
- 2.) Затухание существенно зависит от неровности стенок. Поэтому они обрабатываются по 8-10 классу чистоты поверхности.