



# Антенно-мачтовые сооружения

Подготовили студенты группы СТ-460034

Ендрух К.

Месропян Э.

Потёмкин В.

# 1. Общие сведения

Антенно-мачтовые сооружения – это высотные сооружения, служащие для установки телевизионных антенн, антенн радиовещания, радиосвязи, радиорелейных линий.

# Конструкция

Высотные сооружения для размещения оборудования можно разделить на две большие группы: башни и мачты.



Башни



Мачты

Башни, как правило, предоставляют максимальную нагрузочную способность и обладают максимальной ветровой устойчивостью.

Мачты, в свою очередь, обычно более быстро возводимы и требуют меньших вложений. Причем высота обоих типов сооружений может достигать 100 метров и более, чего вполне достаточно для нужд сотовой связи.

Состоят из ствола, опирающегося на центральный фундамент, оттяжек с анкерными фундаментами. Ствол – чаще решетчатый, призматической формы, трех или четырехгранный. Расстояние между соседними ярусами крепления оттяжек не более  $40b$  – при четырехгранной форме ствола и не более  $30b$  – при трехгранной, где  $b$  – ширина ствола.

Трехгранные мачты расчаливают – тремя оттяжками. Четырехгранные – расчаливают в 2-х взаимно перпендикулярных плоскостях, трубчатые мачты – расчаливают 3-мя, 4-мя и более оттяжками. Угол наклона оттяжек близок к  $45^{\circ}$ . В высоких мачтах оттяжки подкрепляют реями (рисунок 1).

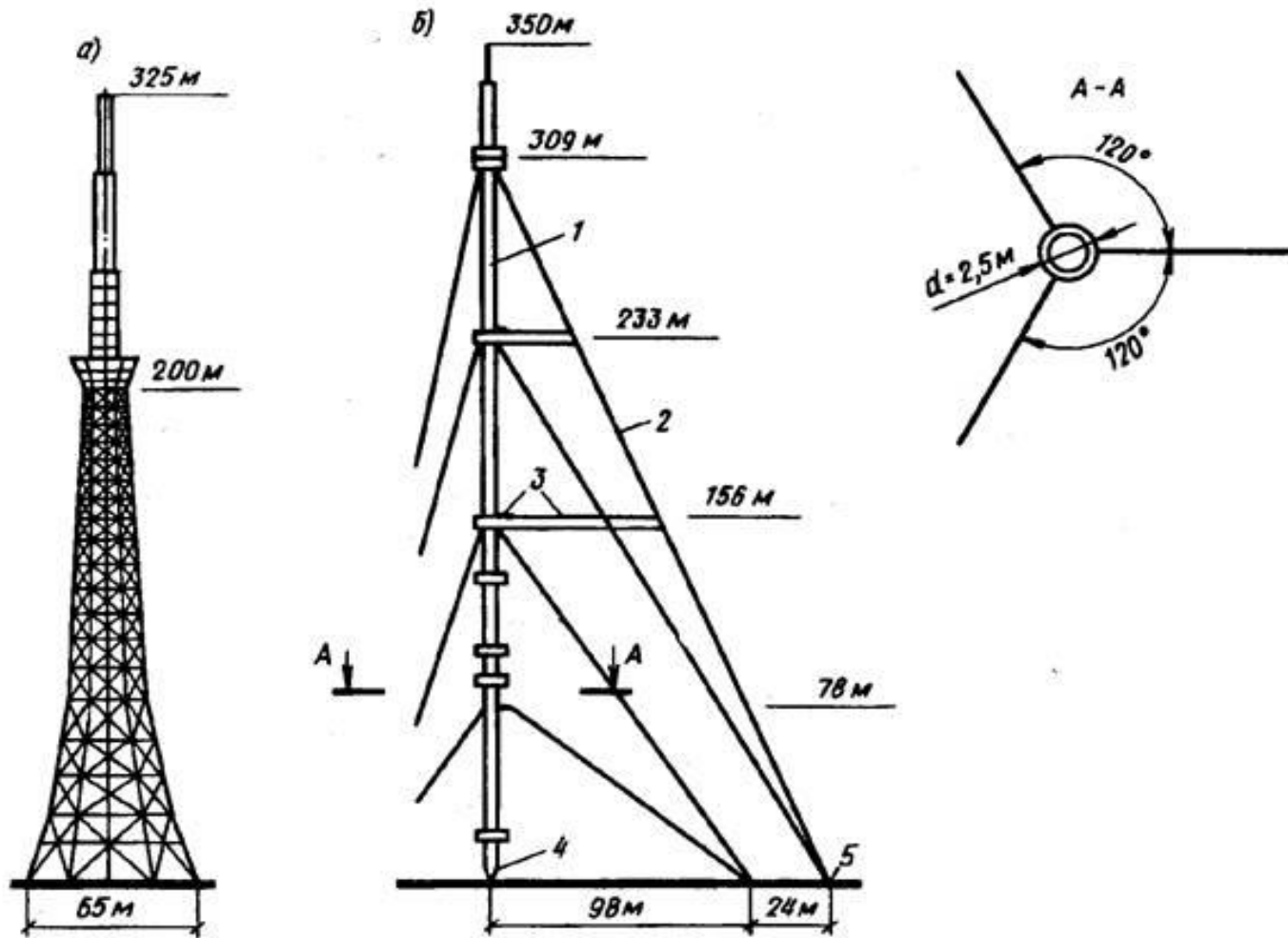


Рисунок 1. Основные виды конструктивных схем высотных сооружений.

а) – башня; б) – мачта; 1 – ствол; 2 – оттяжка; 3 – рея; 4 – центральная опора; 5 – анкерная опора.

## Преимущество мачт

- Экономичность мачт по сравнению с башнями в вопросах расхода металла и итоговой стоимости;
- Небольшая масса, соответственно, на фундамент будет меньшая нагрузка;
- Благодаря существенной протяженности ствола мачты есть возможность установки гораздо большего количества оборудования, например, антенн;
- При необходимости можно использовать конструкцию, состоящую из модулей, позволяющую достаточно легко изменять высоту путем изменения количества секций и ярусов оттяжек;
- При изготовлении мачт секции заказчику поступают в готовом виде, что существенно ускоряет и упрощает сборку конструкции;
- Если во время эксплуатации возникла потребность в усилении сооружения, то затраты на укрепление конструкции будут менее значительные и трудоемкие по сравнению с затратами на усиление башен.

## Недостатки мачт

Помимо преимуществ у мачт есть и свои недостатки. Главным из которых является ощутимо увеличенная площадь застройки, необходимая не только под саму мачту, но и под оттяжки, помогающие конструкции находиться в вертикальном положении. Помимо этого не стоит забывать о том, что в процессе эксплуатации мачт необходимо будет систематично заниматься регулировкой натяжения тросов-оттяжек



# Материалы

Для их изготовления применяют различные конструкционные материалы:

сталь, алюминиевые сплавы, железобетон, асбестоцемент, стеклопластик, древесину и синтетику.

Современная практика строительства антенных сооружений основывается на преимущественном использовании металлов в качестве конструкционных материалов, поскольку это позволяет при сравнительно небольшой собственной массе обеспечить восприятие значительных нагрузок и относительное выполнение конструкциями технологических (радиотехнических) и строительных функций.

Металлические конструкции надежно работают при различных напряженных состояниях и наличии агрессивных эксплуатационных сред, универсальны с точки зрения создания различных конструктивных форм, обладают высокой технологичностью изготовления и монтажа.

Наиболее традиционным и широко применяемым материалом является сталь — сплав железа с углеродом

Механические свойства стали, а также такие качества, как пластичность, хрупкость, свариваемость, зависят от химического состава, определяемого процентным содержанием углерода, а также наличием и количеством добавок — легирующих элементов.

По содержанию углерода сталь делится на:

- малоуглеродистую (0,09...0,22%), применяемую в строительных конструкциях.
- среднеуглеродистую (0,25...0,5%), — в машиностроении и в качестве
- арматуры в железобетонных конструкциях
- высокоуглеродистую (0,6...1,2%) — в инструментальной промышленности.

Малоуглеродистая сталь обладает большой пластичностью, вязкостью, высокой ковкостью, хорошей свариваемостью, отсутствием тенденций к хрупкому разрушению, т. е. отвечает основным требованиям, предъявляемым к строительным сталям.

Для малоуглеродистых сталей обычного качества обозначение марки включает также условие поставки стали (с гарантией только химического состава — группа Б, с гарантией только механических свойств — группа А, с гарантией в комплексе химического состава и механических свойств — группа В) и способ раскисления стали при ее выплавке («сп» — спокойная, «пс» — полуспокойная, «кп» — кипящая).

В марку стали включают цифру, обозначающую категорию, т. е. сочетание дополнительных гарантий по механическим свойствам: марка ВСтЗспб обозначает малоуглеродистую сталь обыкновенного качества, спокойную, поставляемую с гарантией химического состава и механических свойств по пределу текучести, временному сопротивлению, относительному удлинению и с дополнительной гарантией проверки на изгиб в холодном состоянии и ударной вязкости после механического старения. Конкретный перечень свойств, гарантируемый для каждой марки малоуглеродистой стали, приведен в ГОСТ 380—71\*.

Наиболее употребительными марками стали для антенных сооружений являются:

ВСтЗсп5/ВСтЗпс5 (ГОСТ 380—71 и ТУ 14-1-3023—80) для основных элементов со сварными соединениями в мачтах и башнях, эксплуатируемых при температурах воздуха не ниже  $-40^{\circ}$ ;

ВСтЗкп2 (ГОСТ 380—71\* и ТУ 14-1-3023—80) для второстепенных сварных элементов мачт и башен (площадок, лестниц и т. п.), эксплуатируемых при температурах воздуха не ниже  $-40^{\circ}$  С;

09Г2-12 (10Г2С1-12 — ГОСТ 19282—73) для основных элементов со сварными соединениями в мачтах и башнях в «северном» исполнении ( $t \leq 40^{\circ}$  С); ВСтЗсп6 (ГОСТ 380—71\* и ТУ 14-1-3023—80) для второстепенных сварных элементов в «северном» исполнении, а также для основных элементов, изготавливаемых и соединяемых без сварки, в мачтах и башнях того же исполнения.

Основные показатели механических свойств стали: прочность, упругость, пластичность, склонность к хрупкому разрушению.

## 2. Сбор нагрузок

При разработке антенно-мачтовых сооружений учитывают различные по характеру и длительности действия нагрузки, которые эти сооружения должны выдерживать. К их числу относятся:

### Постоянные

- от собственного веса конструкций и веса, установленного оборудования,
- от предварительного напряжения в элементах опоры (оттяжки, гибкие раскосы)

### Временные

- от температурных воздействий в виде перепада температур воздуха

## Кратковременные

- от давления ветра,
- от веса осаждающегося льда,
- от совместного действия гололеда с ветром

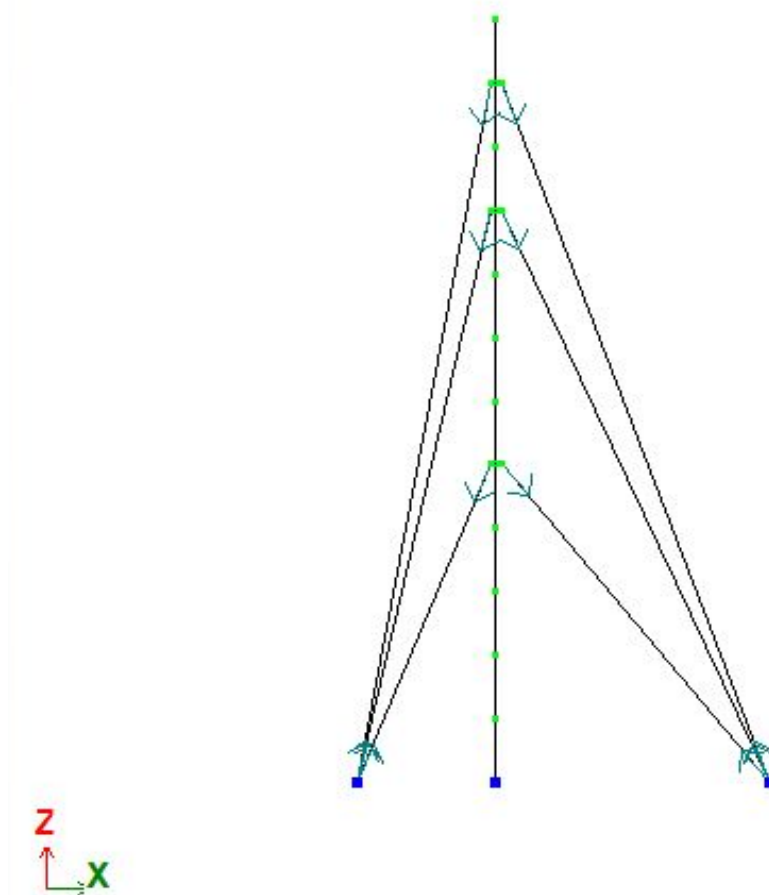
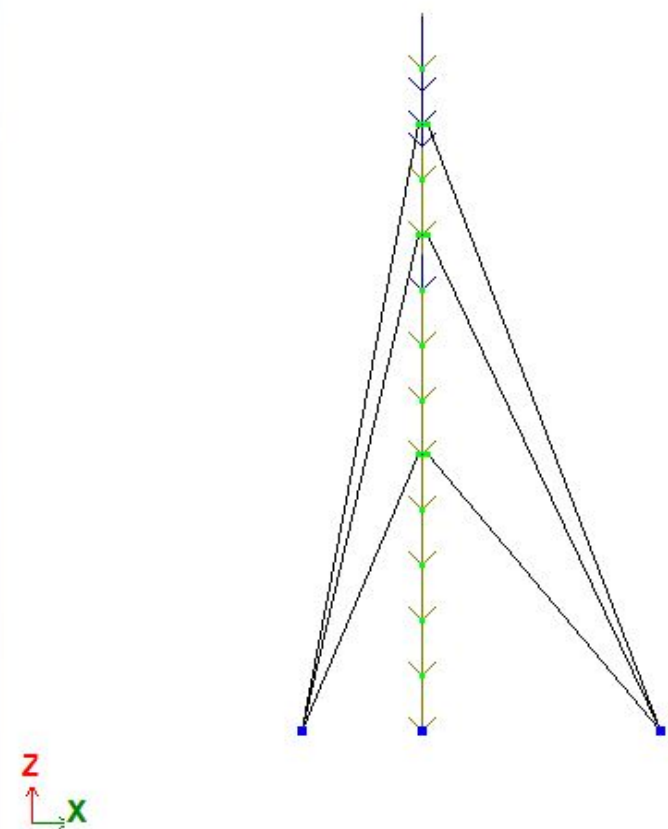
## Особые

- от сейсмических воздействий на опору.

# 3. Построение расчетной схемы

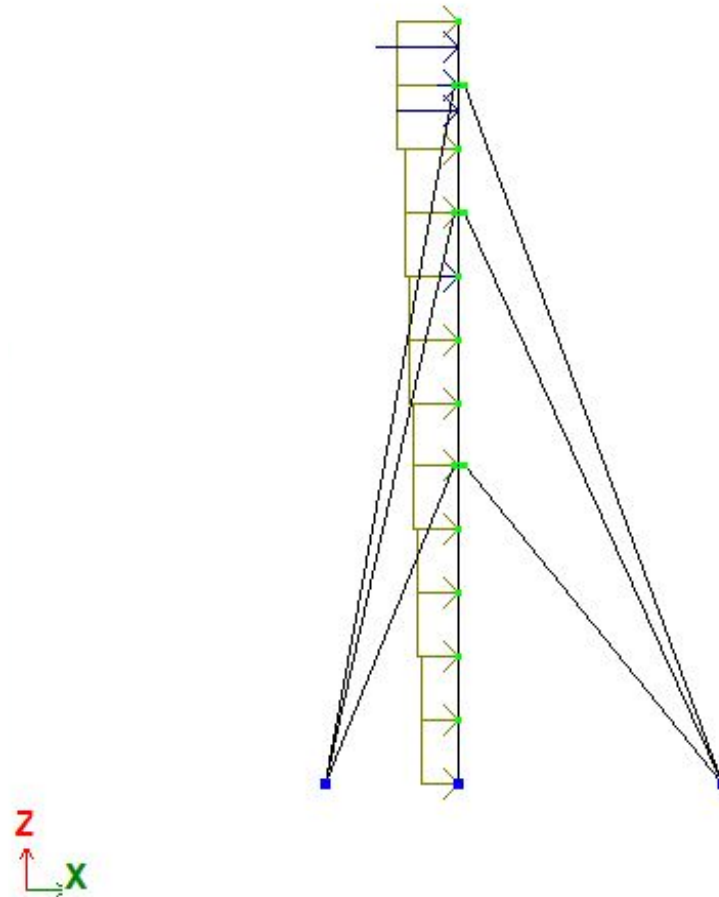
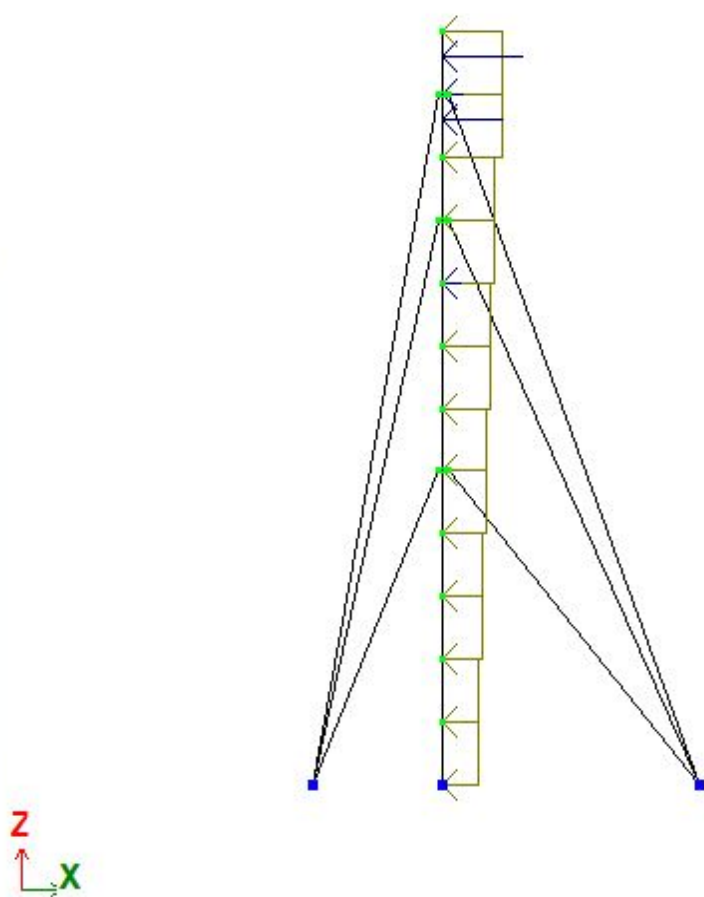
Подробное описание построения расчетной схемы, задание нагрузок, определения проектного натяжения канатов, статический расчет, устойчивость, расчет на пульсационный ветер для мачты на оттяжках в программном комплексе для расчета и проектирования строительных конструкций SELENA приведено на сайте:

<http://selenasys.com/Sample/Mast.aspx>



Постоянная нагрузка Предварительное напряжение  
в элементах опоры





Ветровая нагрузка (напор)      Ветровая нагрузка (отсос)

# 4. Определение внутренних усилий

Полный метод расчета рам приведен:  
«Металлические конструкции. В 3 т. Т.3. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В. Кузнецова (ЦНИИ проектстальконструкция им. Н.П.Мельникова) - М.: изд-во АСВ, 1999.

На мачту при ее эксплуатации постоянно действуют: силы веса ствола  $g_{j\text{cme}}$ , оттяжек  $g_{jom}$ , а также усилия от предварительного напряжения оттяжек в каждом  $j$ -м узле мачты:

$$N_{jot} = \sigma_{jot} F_j n_j \cos \alpha_j$$

где  $j$  – индекс, указывающий на положение узла крепления оттяжки к стволу мачты;

$0, t$  – индексы, указывающие на то, что напряжение монтажное ( $0$  – при отсутствии ветра и обледенения при соответствующей температуре воздуха  $t$ );

$F_j$  – площадь поперечного сечения оттяжки;  $\sigma_{jot}$  – монтажное напряжение в оттяжках данного яруса при рассматриваемой температуре;

$n_j$  – число оттяжек данного яруса в плане;

$\alpha_j$  – угол наклона хорд оттяжек к стволу.

Допускается рассчитывать мачту и проводить оптимизацию ее параметров, используя следующие допущения:

а) мачта расчленяется на ствол и оттяжки;

б) жесткости узлов в расчете на динамическую добавку принимаются постоянными;

в) определение собственных частот и форм колебаний ствола мачты производится только для первого тона при ручном счете, а при использовании ПЭВМ количество учитываемых в расчете тонов определяется в соответствии с разделом 11 СП 20.13330.2016;

г) приращение напряжений и перемещений от динамических добавок определяется для каждой формы раздельно.

д) усилия в оттяжках находятся из расчета отдельных вант на суммарные нагрузки от расчетного ветра с учетом коэффициента пульсаций и коэффициента корреляции и прикладываемых статически к оттяжке, у которой точка крепления к стволу мачты переместилась в положение, определяемое от суммарных воздействий - статических и динамических добавок.

# Расчет нитей

Расчетные данные для нитей, нагруженных равномерно по длине (цепная линия), по горизонтали (парабола) и в направлении радиусов (окружность), приведены в табл. 1.

# Таблица 1

## Основные расчетные данные для нитей различного

Расчетный показатель			Нагрузка на нить		
			постоянная по длине	постоянная по длине горизонтальной проекции (хорде)	постоянная и действующая в направлении радиусов с центром $O_1$
<p>Схема приложения нагрузок и обозначения</p>					
<p>Уравнение кривой</p>			$y = y_0 ch \frac{x}{y_0},$ <p>где <math>y_0 + f_0 = y_0 ch \frac{l}{2y_0}</math>.</p>	$y = \frac{g_{эксв} x^2}{2H}.$	$y = \rho - \sqrt{\rho^2 - x^2},$ <p>где <math>\rho = \frac{l^2 + 4f_0^2}{8f_0}</math>.</p>
<p>Вид кривой</p>			Цепная линия	Парабола	Окружность
Длина дуги $S$	Формула	точная	$S = l \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f_0}{l} \right)^2 + \frac{32}{15} \left( \frac{f_0}{l} \right)^4 + \dots + \frac{\left( \frac{f_0}{l} \right)^{2n} \cdot 2^{4n}}{(2n+1)!} \right]; \quad \frac{f_0}{l} \leq 1.$	$S = l \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{f_0}{l} \right)^{2n} (-1)^{n+1} \times \prod_{k=1}^n (2k-3) \frac{2^{3n}}{n!(2n+1)} \right];$ <p><math>f_0/l &lt; 1/4</math></p>	$S = l \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\prod_{k=1}^n (2k-1) 2^{4n}}{(2n+1) \prod_{k=1}^n (2k)} \left( \frac{f_0}{lk} \right)^{2n} \right]; \quad \frac{f_0}{l} \leq \frac{1}{2}$ $S = 2\pi\rho - l \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\prod_{k=1}^n (2k-1) 2^{4n}}{(2n+1) \prod_{k=1}^n (2k)} \left( \frac{f_0}{lk} \right)^{2n} \right]; \quad f_0/l > 1/2$

# Окончание таблицы 1

Расчетный показатель			Нагрузка на нить		
			постоянная по длине	постоянная по длине горизонтальной проекции (хорде)	постоянная и действующая в направлении радиусов с центром $O_1$
Длина дуги $S$	Формула	приближенная	$S \approx l \left[ 1 + \frac{8}{3} \cdot \left( \frac{f_0}{l} \right)^2 \right]$	$S \approx l \left[ 1 + \frac{8}{3} \cdot \left( \frac{f_0}{l} \right)^2 \right]$	$S \approx l \left[ 1 + \frac{8}{3} \cdot \left( \frac{f_0}{lk} \right)^2 \right]$ где $k = 1 + \frac{4f^2}{l^2}$
Зависимость между прогибом в нижней точке нити $f_0$ и усилием $H$			$H \approx \frac{g_{экс} l^2}{8f_0} = \text{const}$	$H \approx \frac{g_{экс} l^2}{8f_0} = \text{const}$	$H = \frac{g_{экс} (l^2 + 4f_0^2)}{8f_0} = \text{const}$
Усилия	вертикальное $V_i$		$V = \frac{g_{экс} S}{2}$	$V = \frac{g_{экс} l}{2}$	$V_i = T \sin \varphi$
	горизонтальное $H_i$		$H_i = H = \frac{g_{экс} l^2}{8f_0} = \text{const}$	$H_i = H = \frac{g_{экс} l^2}{8f_0} = \text{const}$	$H_i = T \cos \varphi$
	в нити $T_i$		$T_i = \sqrt{H^2 + V^2} = H \sqrt{1 + \left( \frac{4f_0 S}{l^2} \right)^2}$	$T_i = \sqrt{H^2 + V^2} = H \sqrt{1 + \left( \frac{4f_0}{l^2} \right)^2}$	$T_i = T = g_{экс} \rho = \text{const}$

При загрузке нити сосредоточенными силами расчет можно вести на распределенную эквивалентную нагрузку, которая при числе сосредоточенных сил более трех и равномерном их распределении по пролету может быть определена по формуле:

$$g_{\text{ЭКВ}} = \sum \frac{P_i}{l}$$

или во всех случаях

$$g_{\text{ЭКВ}} = 8M_{\text{max}}/l^2$$

где  $M_{\text{max}}$  - максимальный изгибающий момент, определенный как для однопролетной балки от действия сил  $P_i$ .



Если наклонная нить, имеющая  
распределенный вес, удовлетворяет условию

$$g_0/L < \operatorname{tg}\alpha/160,$$

то ее можно рассчитывать как нить пролетом  $L$   
под нагрузкой  $g_0 \sin\alpha$ .

Усилия в верхней и нижней точках закрепления наклонной нити оттяжки определяют по формулам:

$$T_A = \sqrt{F^2 \sigma_0^2 - F^2 \sigma_0^2 g_0 h + \frac{g_0^2 l^2}{4}} = H_0 - \frac{g_0 l}{2}$$
$$T_B = \sqrt{F^2 \sigma_0^2 - F^2 \sigma_0^2 g_0 h + \frac{g_0^2 l^2}{4}} = H_0 - \frac{g_0 l}{2}$$

где  $H_0 = \sigma_0 F$  ;

$H_0$  - монтажное усилие в середине оттяжки;

$T_A$  - усилие в оттяжке у точки закрепления к анкеру;

$T_B$  - усилие в оттяжке у точки закрепления к стволу;

$g_0$  - эквивалентный вес 1 м длины оттяжки;

$h = L \cos \alpha$  - расстояние между точками закрепления оттяжки по вертикали;

$L$  - длина оттяжки по хорде.

Истинная длина нити, т.е. длина в напряженном состоянии при постоянной температуре

$$l_u = l \frac{1 + 8f^2 / 3l^2}{1 + \sigma / E} \approx l \left( 1 + \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{l^2} - \frac{\sigma}{E} \right),$$

В связи с нелинейной зависимостью между нагружением и изменением напряжений разрешается при расчете нитей учитывать предельные состояния введением специального коэффициента  $\eta$ .

$$\sigma \leq R_{ук} \gamma_c \eta;$$

$$R_{ук} = R_{un} / \gamma_m,$$

где  $R_{un}$  - временное сопротивление разрыву каната в целом;

$\gamma_m = 1,6$  – коэффициент надежности;

$\gamma_c$  - коэффициент условия работы;

$$\eta = \frac{Q_{пред}}{Q_{дон}} = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \cdot \frac{R_{ун}}{E} \left(\frac{l}{f}\right)^2 \cdot \frac{k_{зап} - 1}{k_{зап}} (1 - k_{\Delta})},$$

$k_{зап}$  - фактический коэффициент запаса при расчете в линейной постановке;

$$k_{\Delta} = \pm \nu \frac{E}{F} = \pm \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{E}{R_{un} / k_{зан} - \sigma_0};$$

$\nu$  - коэффициент, характеризующий податливость опоры;

$\sigma_0$  - монтажное напряжение;

$k_{\Delta}$  - знак зависит от направления смещения опоры, а размер - от значений входящих в эту величину параметров:

*при  $\eta > 1$   $k_{\Delta} < 1$ ;*

*при  $\eta < 1$   $k_{\Delta} > 1$*

# Расчет монтажных узлов мачты

Подробное описание расчета узлов  
приведено на сайте:

[https://исполнительнаядокументация.  
рф/wp-content/uploads/2016/11/Raschyot-machty  
%60-na-ottyazhkah.pdf](https://исполнительнаядокументация.рф/wp-content/uploads/2016/11/Raschyot-machty%60-na-ottyazhkah.pdf)



# Расчет сварных соединений во фланцевом соединении ствола мачты

## Расчет сварки на условный срез

Длина сварного шва численно равна длине окружности.

Расчет ведется по соотношению плотности сварочного шва

$$\frac{N}{t \cdot l_w} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c$$

$R_{wy} = R_y$ , из табл. 4 СП 16.13330.2017

$l_w = 2\pi R$

# Расчет фланцевого соединения на высокопрочных болтах

Соединения на высокопрочных болтах следует на трение, возникающее по соприкасающимся плоскостям соединяемых элементов от натяжения высокопрочных болтов. При этом распределение продольной силы между болтами следует принимать равномерным.

Расчетное усилие, воспринимаемое одним болтом, рассчитывается по формуле:

$$Q_{bh} = \frac{R_{bn} \cdot \gamma_b \cdot A_{bn} \cdot \mu}{\gamma_h}$$

$R_{bn}$  – расчетное сопротивление растяжению высокопрочного болта;

$\mu$  – коэффициент трения по табл. СП 16.13330.2017

$\gamma_h$  – коэффициент надежности;

$A_{bn}$  – площадь сечения болта нетто;

$\gamma_b$  – коэффициент условий работы ( $\gamma_b = 1$ );

Из условий работы болтового соединения, расчет ведется на растяжение, смятие и срез.

$$N_b = R_{bs} \cdot \gamma_b \cdot A_s \cdot n_s - \text{на срез}$$

$$N_b = R_{bt} \cdot A_{bn} - \text{на растяжение/сжатие}$$

$$N_b = R_{bp} \cdot \gamma_b \cdot d_t \cdot \sum t - \text{на смятие}$$

# 5. Особенности

Мачты на оттяжках являются достаточно специфическим объектом расчета, который характеризуется следующими особенностями:

- нелинейная работа вантовых элементов (оттяжек);
- необходимость задания усилий предварительного напряжения;
- необходимость учета «эффекта силы направленной в полюс» для передачи усилий от оттяжки на ствол;
- критичностью проверок устойчивости равновесия ствола.