

Расчет аппаратов на ветровую нагрузку



Высотные колонные аппараты и печи,
установленные на открытом воздухе

Воздействие ветровых нагрузок на колонный аппарат



- Значение ветровой нагрузки непостоянно по высоте колонного аппарата;
- Ветровая нагрузка непостоянна по своему направлению;
- Верх колонного аппарата совершает сложное колебательное движение в направлении, перпендикулярном направлению ветровой нагрузки.
- Таким образом, к статической составляющей добавляется и

1 Область применения, цель и задачи расчета, исходные данные

Расчет аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмического воздействия производится согласно:

- **ГОСТ Р 51273-99 (2006)** «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий»:
- **ГОСТ Р 51274-99 (2006)** «Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность».

Согласно этим документам расчету на **ветровую** нагрузку подлежат аппараты, устанавливаемые на открытой площадке.

Расчету на **сейсмическое** воздействие подлежат аппараты, предназначенные для установки в районах с сейсмичностью 7 и более баллов по шкале Рихтера.

При этом может рассчитываться как **отдельно** стоящий аппарат, так и **групповые** аппараты, установленные на общем фундаменте и жестко связанные в горизонтальном направлении.

Цель расчета в курсовом проекте:

- проверка **прочности и устойчивости корпуса** колонного аппарата в сечении В-В под совместным воздействием давления $P_{рас}$ (внутреннего или наружного), осевой сжимающей силы F от собственного веса и изгибающего момента M_V , возникающего от ветровых нагрузок (в курсовом проекте сечение В-В совмещается с сечением Г-Г, рисунок 5.4);

- проверка **прочности сварного шва** (сечение Г-Г) под воздействием изгибающего момента M_V и осевой сжимающей силы F . При этом следует учесть, что в опорной обечайке избыточное давление отсутствует ($P_{рас} = 0$);

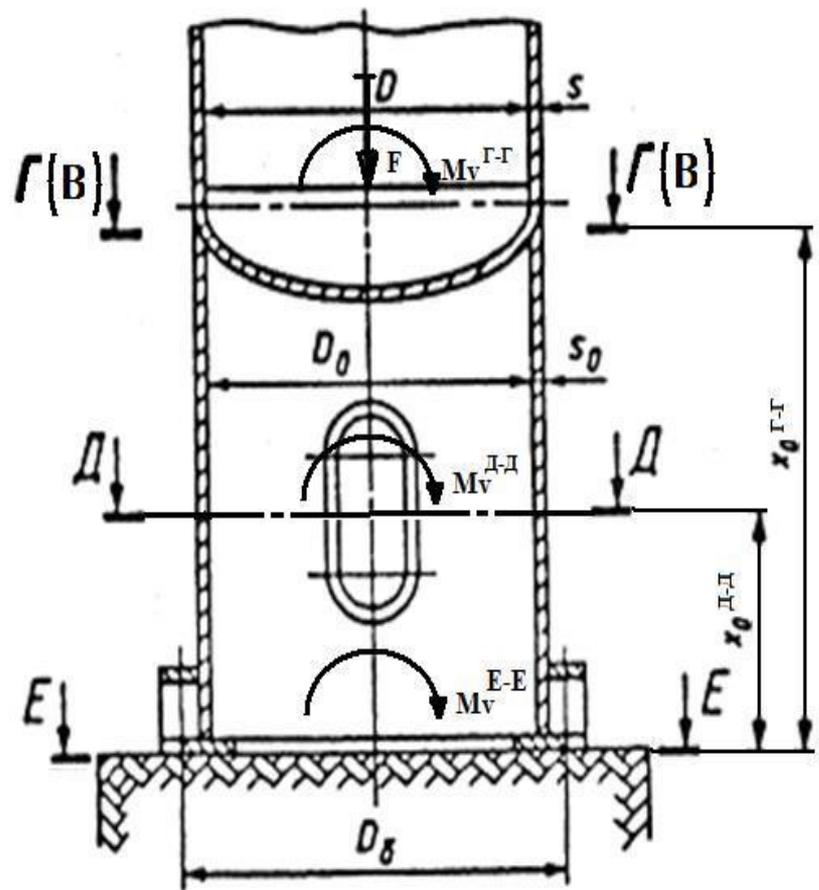
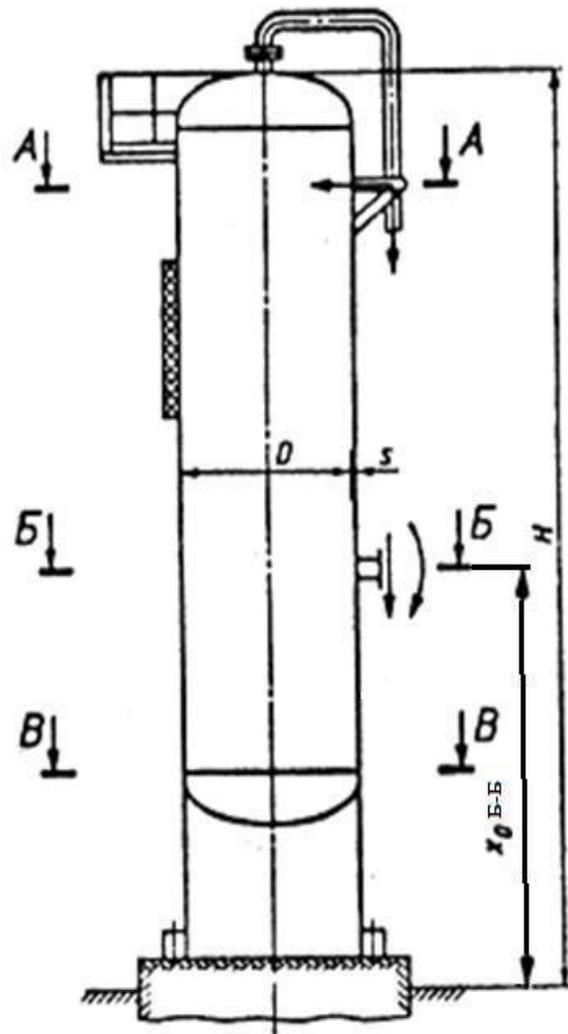
- проверка **устойчивости опорной обечайки** в наиболее ослабленном отверстиями сечении (сечение Д-Д) под воздействием изгибающего момента M_V и осевой сжимающей силы F .

- расчет **элементов опорного узла** в месте присоединения нижнего опорного кольца (сечение Е-Е) под воздействием изгибающего момента M_V и осевой сжимающей силы F :

а) определение **ширины нижнего опорного кольца** (проверка прочности бетона);

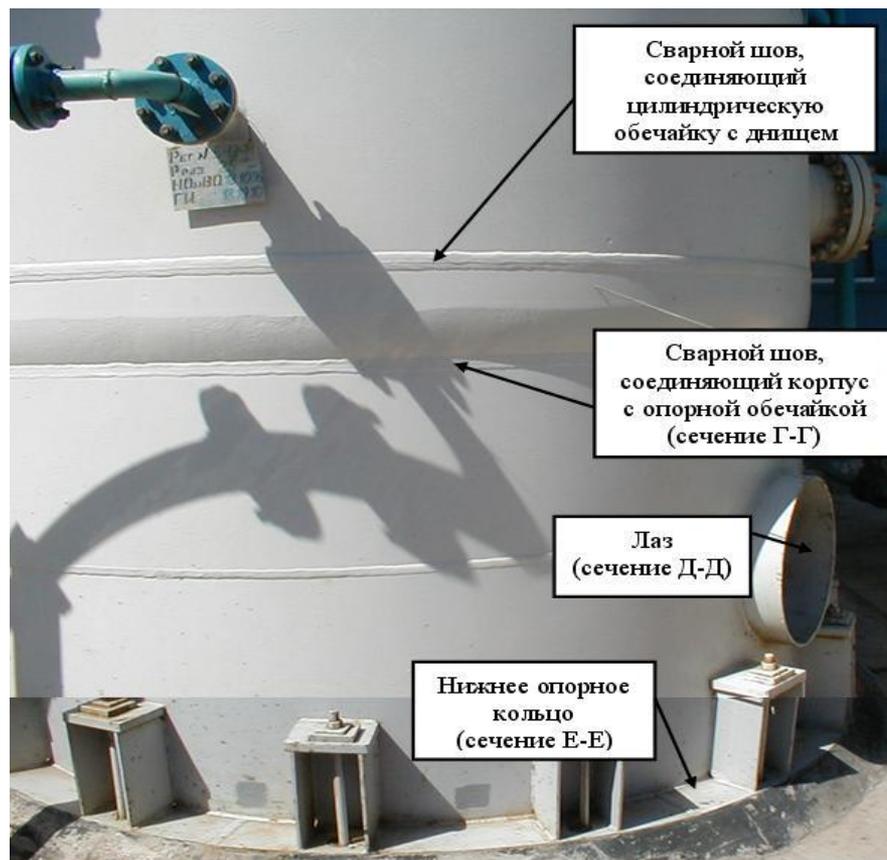
б) расчет на **прочность анкерных болтов** (определение внутреннего диаметра резьбы анкерных болтов).

Необходимость в проверке прочности и устойчивости возникает вследствие того, что толщина стенки корпуса была определена только под действием внутреннего или наружного расчетного давления, без учета дополнительного воздействия осевой сжимающей силы и изгибающего момента, напряжения от которых могут достигать больших величин и привести к разрушению колонного аппарата.



Расчетные сечения: а) – корпуса; б), в) - опорной обечайки аппарата

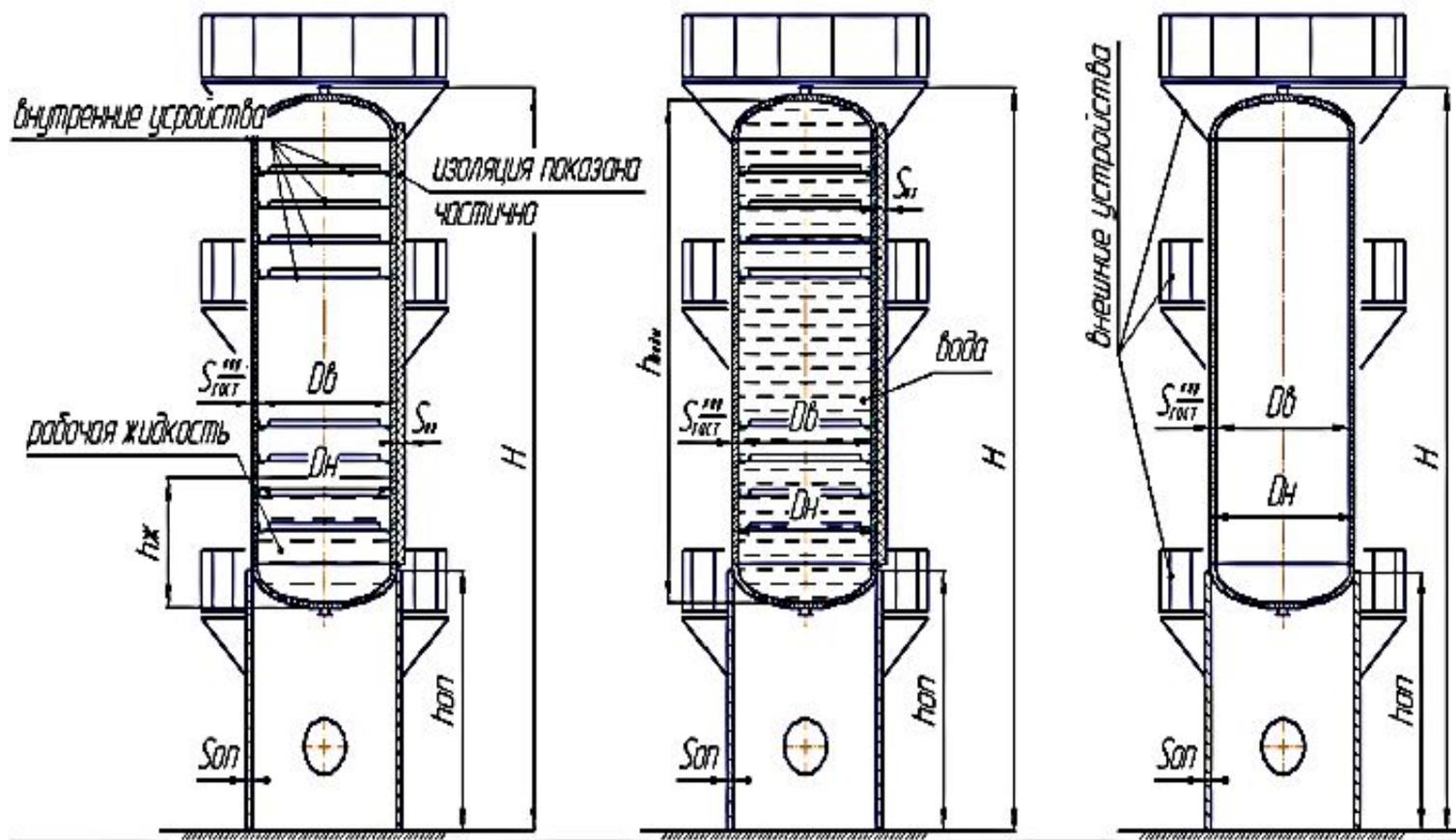
Расчетные сечения опорной обечайки



сечение Г-Г – поперечное сечение опорной обечайки в месте присоединения к корпусу; сечение Д-Д – поперечное сечение опорной обечайки в местах расположения отверстия (лаза); сечение Е-Е – поперечное сечение опорной обечайки в месте присоединения нижнего опорного кольца к фундаменту

Стандартная цилиндрическая опора, тип 2 – с наружными стойками под болты

Расчетные условия, для которых необходимо рассчитывать аппарат



а) – рабочие условия, б) – условия испытаний, в) – условия монтажа

Порядок расчета колонных аппаратов от ветровых нагрузок

Расчет на ветровую нагрузку по стандарту состоит из двух частей:

- в первой из которых определяются изгибающие моменты от ветровых нагрузок в каждом расчетном сечении по ГОСТ 51273-99,
- во второй - производится расчет на прочность и устойчивость отдельных элементов аппарата по ГОСТ 51274-99.

Порядок расчета колонного аппарата от ветровой нагрузки следующий:

- определяются **исходные данные**;
- разрабатывается расчетная схема аппарата, определяется **количество участков z** и их параметры;
- определяется **период** собственных колебаний для трех расчетных условий $u = 1; 2; 3$;
- находятся **ветровые нагрузки P_i** на каждом участке для трех расчетных условий $u = 1; 2; 3$;
- определяются **изгибающие моменты M_v** в каждом из расчетных сечений аппарата (Г-Г, Д-Д, Е-Е) для $u = 1; 2; 3$;
- проводится **проверка прочности и устойчивости стенки корпуса** колонного аппарата для $u = 1; 3$ в следующих расчетных сечениях:
 - а) для аппаратов **постоянного** поперечного сечения - в сечении В-В, (т.е. в поперечном сечении, где корпус присоединяется к опорной обечайке), под суммарным воздействием $P_{рас}$, F и M_u (в КП сечение В-В совмещается с сечением Г-Г, для аппаратов, работающих под избыточным давлением или без давления проверка **устойчивости** корпуса **не производится**);
 - б) для аппаратов **переменного** сечения – в поперечных сечениях корпуса, переменных по диаметру и/или толщине стенки (в КП производится проверка только в сечении Г-Г), если не выполняются проверка прочности или устойчивости корпуса необходимо увеличить толщину стенки и весь расчет повторить;
- выбирается **тип опорной обечайки** и определяются все размеры опорного узла;
- производится **проверка прочности сварного шва** в сечении Г-Г под суммарным воздействием F и M_u для $u = 1; 2$;
- производится **проверка устойчивости** опорной обечайки в сечении Д-Д под суммарным воздействием F и M_u для $u = 1; 2$;

(если не выполняются проверка прочности или устойчивости корпуса или опорной обечайки, необходимо увеличить толщину стенки и весь расчет повторить):

Определение веса колонного аппарата и осевой сжимающей силы

Вес колонны находится для каждого расчетного условия, т.е. для $u = 1; 2; 3$.

Для определения общего веса колонны G рассчитывается вес каждого участка G_i , который сосредоточен в середине участка .

Осевая сжимающая сила F находится как сумма весов всех участков, т.е.

$$F = G = \sum G_i$$

Вес каждого участка, в зависимости от условий работы, складывается

из веса корпуса аппарата G_k , веса изоляции $G_{из}$, веса рабочей жидкости $G_{р.ж.}$ или веса воды G_v , веса внутренних устройств $G_{вн.у.}$, веса внешних устройств.

В курсовом проекте принимаем, что вес внешних устройств (площадок, штуцеров фланцев, люков, лазов) составляет приблизительно 18 % от собственного веса стального корпуса G_k и опоры.

Методика расчета веса колонного аппарата и осевой сжимающей силы

Определение веса колонного аппарата и осевой сжимающей силы осуществляется по следующей методике для трех расчетных условий

Для рабочих условий ($u=1$) вес i -го участка колонного аппарата рассчитывается по формуле

$$G_i^1 = G_{к.і} + G_{из.і} + G_{р.ж.і} + G_{вн.у.і} + 0,18 \cdot G_{к.і} ,$$

где $G_{к.і}$ - вес стального корпуса и опорной обечайки колонны на i -м участке, Н;

$G_{из.і}$ - вес изоляции на i -м участке, Н;

$G_{р.ж.і}$ - вес рабочей жидкости на i -м участке, Н;

$G_{вн.у.і}$ - вес внутренних устройств на i -м участке, Н;

$0,18 \cdot G_{к.і}$ - вес штуцеров, площадок, люков, который в КП принимаем равным 18 % веса $G_{к.і}$.

Вес материала корпуса и опоры аппарата определяется по формуле

$$G_{к.і} = G_{цил.і} + G_{дн.і} ,$$

где $G_{цил.і}$ - вес металла цилиндрической части i -го участка аппарата, Н;

$G_{дн.і}$ - вес металла днища i -го участка аппарата, Н.

Теплоизоляционный материал выбирается по таблице в зависимости от рабочей температуры, после чего определяется толщина изоляции $S_{из}$ исходя из диаметра

Для условий испытаний ($u=2$) вес i -го участка рассчитывается следующим образом

$$G_i^2 = G_{k.i} + G_{из.i} + G_{в.i} + G_{вн.у.i} + 0,18 \cdot G_{к.i} ,$$

где $G_{в.i}$ - вес воды на i -м участке, Н.

Для условий монтажа ($u=3$) в КП принимаем, что аппарат пустой, без изоляции, но с обслуживающими площадками и штуцерами.

Вес i -го участка в этом случае определяется по формуле

$$G_i^3 = G_{к.i} + 0,18 \cdot G_{к.i} .$$

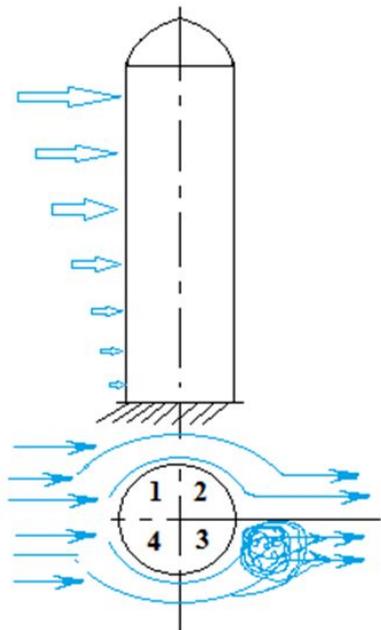
Определение ветровых нагрузок

Одна из задач при проведении расчета колонного аппарата от ветровых нагрузок заключается в определении непосредственно **силы ветра (ветровой нагрузки)**.

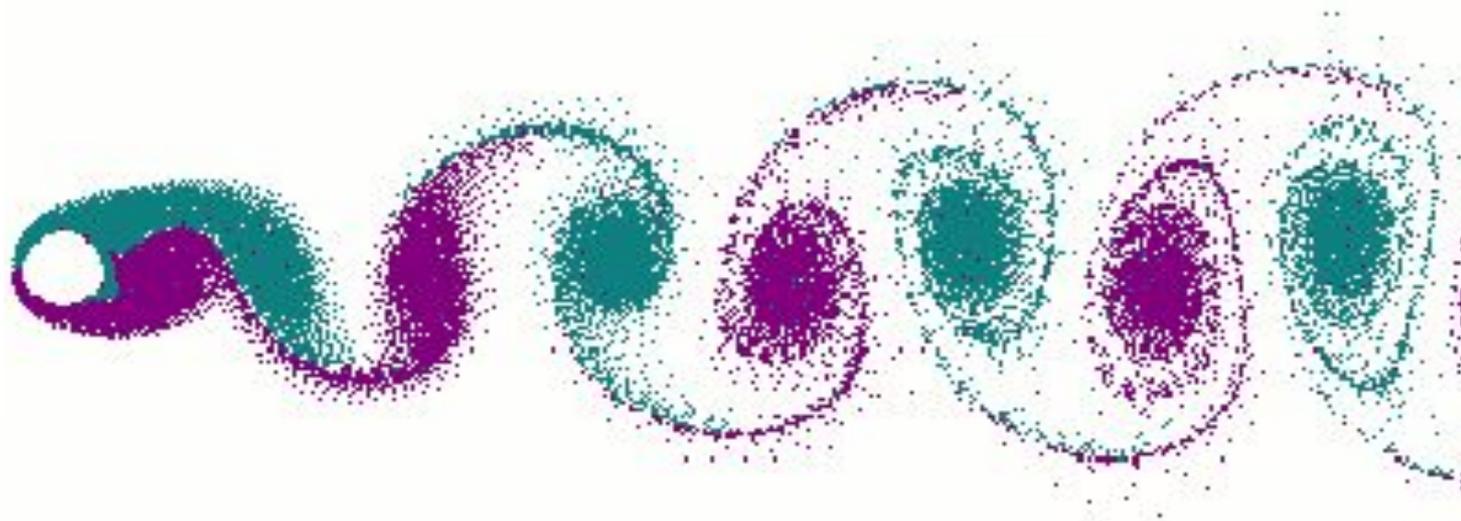
При этом если несущие конструкции зданий и строительных сооружений обычно рассчитывают в предположении действия **установившегося ветра**, такое предположение оказывается **недостаточным** при расчете вертикальных цилиндрических аппаратов нефтеперерабатывающих заводов, устанавливаемых на открытом воздухе.

При этом **установившийся** ветер в гибких высоких сооружениях цилиндрической формы, кроме **статического действия**, которое зависит от изменения средних скоростей ветра по высоте колонны, вызывает **колебания, перпендикулярные** к направлению потока ветра.

Для аппаратов колонного типа следует принимать во внимание также **динамические нагрузки**, накладывающиеся на установившийся поток ветра, которые возникают от воздействия **порывов ветра**, наиболее интенсивных у поверхности земли из-за наличия неровностей и препятствий. Порывы ветра вызывают **пульсацию скорости** воздушных потоков.



Вихревая дорожка Кармана



Таким образом, сила ветра складывается из:

- установившегося потока, который оказывает статическое действие;
- динамической составляющей, являющейся функцией пульсации скоростного напора и периода колебаний колонного аппарата.

Поэтому прежде чем рассчитать ветровые нагрузки необходимо определить период собственных колебаний аппарата.

Определение периода основного тона собственных колебаний аппарата

Для **аппаратов постоянного сечения** период собственных колебаний T , с определяется для трех расчетных условий работы по формуле

$$T_v = T_{0v} \cdot \sqrt{1 + \frac{4 \cdot E \cdot J}{H \cdot C_F \cdot J_F}},$$

где $T_{0v} = 1,8 \cdot H \sqrt{\frac{G_v \cdot H}{g \cdot E \cdot J}}$,

E – модуль упругости материала колонны при расчетной температуре $t_{рас}$, Н/м² ;

J – момент инерции верхнего основного металлического сечения аппарата относительно центральной оси, м⁴;

H – общая высота колонны, м;

J_F – минимальный момент инерции подошвы фундамента, м⁴;

C_F – коэффициент неравномерности сжатия грунта, определяется по данным инженерной геологии, при отсутствии таких данных $G_F = 6 \cdot 10^7$ Н/м³

При отсутствии данных о фундаменте в первом приближении допускается принимать $T = T_0$.

Период собственных колебаний **аппарата переменного сечения** определяется для трех расчетных условий по формуле

$$T_v = 2 \cdot \pi \cdot H \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^Z G_{vi} \cdot \alpha_i^2}{g \left(\frac{H}{2 \cdot E \cdot J_1} \cdot \gamma + \frac{1}{C_F \cdot J_F} \right)}}$$

где α - относительное перемещение центра тяжести i -го участка;
 γ – коэффициент.

Определение ветровой нагрузки на каждом участке

Ветровая нагрузка состоит из двух составляющих:

- **статической** (по ГОСТ Р 51273 – 99 (2006) это средняя составляющая ветровой нагрузки);
- **динамической** (по ГОСТ Р 51273 – 99 (2006) – это пульсационная составляющая ветровой нагрузки).

Таким образом, ветровая нагрузка P_i на i -м участке для трех расчетных условий находится как сумма двух слагаемых:

- $P_{i\text{ st}}$ - средняя составляющая ветровой нагрузки на i -м участке, Н;
- $P_{i\text{ dyn}}$ - пульсационная составляющая ветровой нагрузки на i -м участке, Н.

$$P_i = P_{i\text{ st}} + P_{i\text{ dyn}}$$

где

$$P_{i\text{ st}} = q_{i\text{ st}} \cdot D_i \cdot h_i$$

$$P_{i\text{ dyn}} = v \cdot G_i \cdot \xi \cdot \eta_i,$$

$q_{i\text{ st}} = q_0 \cdot \theta_i \cdot K$ - нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на середине i -го участка, Н/м²;

q_0 – нормативное значение ветрового давления на высоте 10 м над поверхностью земли, Н/м², определяется в зависимости от района в котором расположен аппарат;

θ_i - коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте аппарата;
 K - коэффициент, учитывающий пространственную корреляцию пульсации давления ветра.

ξ - коэффициент динамичности при ветровой нагрузке ;

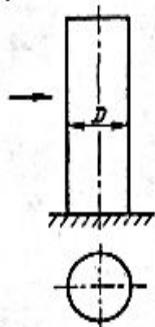
η_i - приведенное относительное ускорение центра тяжести i -го участка.

Общий вид обслуживающей площадки



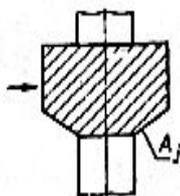
Аэродинамические коэффициенты

Круговой цилиндр



$K=0,7$

Площадка*
(общая площадь)



$K=0,85$

Площадка**
(отдельный профиль)



$K=1,4$

Определение расчетного изгибающего момента от ветровой нагрузки

Расчетный изгибающий момент от ветровой нагрузки M_V и сейсмической нагрузки M_R согласно стандарту должен определяться для всех расчетных сечений и для трех расчетных условий. В учебных работах значения изгибающих моментов находятся только для сечений Г-Г, Д-Д и Е-Е.

Расчетный изгибающий момент складывается из двух составляющих:

- **изгибающий момент от действия P_i -ой ветровой нагрузки на колонный аппарат** (сумма произведений ветровой нагрузки на плечо, где плечо - это расстояние от рассматриваемого сечения Г-Г, Д-Д или Е-Е до центра тяжести i -го участка);

- **изгибающий момент от действия ветра на обслуживающие площадки и лестничные**

Таким образом, расчетный изгибающий момент в сечении на высоте x_0 следует определять по формуле

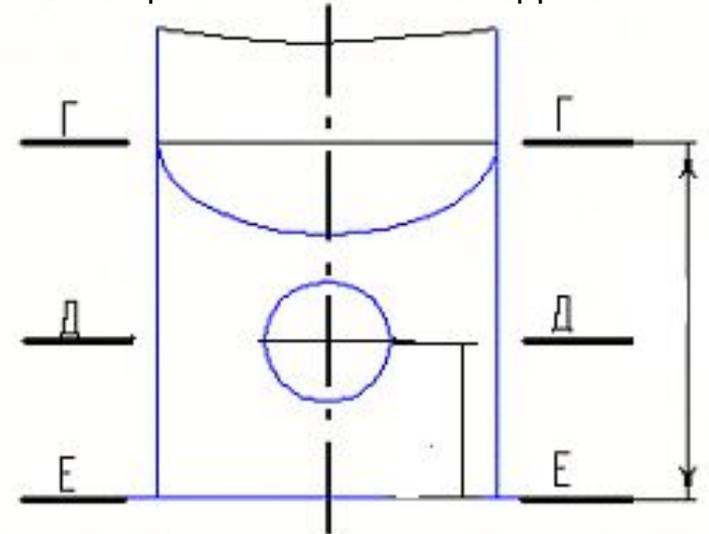
$$M_v = \sum_{i=1}^n P_i(x_i - x_0) + \sum_{j=1}^m M_{vj}$$

где n – число участков над рассматриваемым расчетным сечением;

m – число площадок над рассматриваемым расчетным сечением;

$P_i \cdot (x_i - x_0)$ - изгибающий момент в расчетном сечении на высоте x_0 от поверхности земли, возникающий от действия ветровой нагрузки на i -й участок колонны, Н·м;

M_{vj} – изгибающий момент в расчетном сечении на высоте x_0 от действия ветровой нагрузки на j -ю обслуживающую площадку, Н·м,)



$$M_{vj} = K \cdot q_0 \cdot \theta_j \cdot (x_j - x_0) \cdot (1 + 0,75 \cdot \xi \cdot \chi_j \cdot m_j) \cdot \sum A_p$$

При отсутствии точных данных о форме площадки изгибающий момент определяется следующим образом

$$M_{vj} = K \cdot q_0 \cdot \theta_j \cdot (x_j - x_0) \cdot (1 + 0,75 \cdot \xi \cdot \chi_j \cdot m_j) \cdot A_j$$

где x_0 - высота от поверхности земли до расчетного сечения, м;

x_j – координаты площадок – высота от поверхности земли до j-й площадки, м;

K – аэродинамический коэффициент определяют в зависимости от наличия исходных данных о форме площадки (в практической работе принимаем, что форма площадки неизвестна, тогда $K = 0,85$);

$\sum A_p$ - сумма площадей всех проекций профилей j –й площадки на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, м² ;

A_j – площадь, ограниченная контуром j –й площадки, м².

Сочетание нагрузок для трех расчетных состояний по ГОСТ Р 51274-99

Условия	Расчетное давление p , МПа (кгс/см ²)	Осевое сжимающее усилие F , Н (кгс)	Расчетный изгибающий момент M , Н м (кгс·см)
Рабочее условие ($u = 1$)	p_1	$F_1 = G_1$	$M_1 = M_{G1} + M_{v1}$ Для сейсмических районов принимают большее из двух значений: $M_1 = M_{G1} + M_{v1}$ $M_1 = M_{G1} + M_{R1}$
Условие испытания ($u = 2$)	p_2	$F_2 = G_2$	$M_2 = M_{G2} + 0.6M_{v2}$
Условие монтажа ($u = 3$)	0	Для анкерных болтов $F_3 = G_4$	$M_3 = M_{G3} + M_{v3}$ Для сейсмических районов принимают большее из двух значений: $M_3 = M_{G3} + M_{v3}$ $M_3 = M_{G3} + M_{R3}$

Проверка на прочность и устойчивость стенки корпуса аппарата

Проверку прочности в соответствии со стандартом следует проводить для рабочего условия и условия монтажа в следующих расчетных сечениях:

- **для аппаратов постоянного поперечного сечения** - в поперечном сечении, где корпус присоединяется к опорной обечайке (сечение В-В, в КП сечение В-В совмещается с сечением Г-Г), под суммарным воздействием $P_{рас}$, F и M_u ;

- **для аппаратов переменного сечения** – в поперечных сечениях корпуса, переменных по диаметру и/или толщине стенки (В1-В1 и т.д.).

В КП в том и другом случае производится проверка только в сечении Г-Г.

Продольные (меридиональные) напряжения возникают от всех трех нагрузок $P_{рас}$, F и M_u и определяются на наветренной и подветренной сторонах соответственно по следующим формулам

$$\sigma_{m1} = \sigma_{x1} = \frac{P \cdot (D_i + S_i)}{4 \cdot (S_i - C)} - \frac{F}{\pi \cdot D_i \cdot (S_i - C)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D_i^2 \cdot (S_i - C)}$$

$$\sigma_{m2} = \sigma_{x2} = \frac{P \cdot (D_i + S_i)}{4 \cdot (S_i - C)} - \frac{F}{\pi \cdot D_i \cdot (S_i - C)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D_i^2 \cdot (S_i - C)}$$

Кольцевые (тангенциальные) напряжения возникают только от внутреннего (наружного) давления и рассчитываются по формуле

$$\sigma_t = \sigma_y = \frac{P \cdot (D_i - S_i)}{2 \cdot (S_i - C)}$$

В формулы меридиональных и тангенциальных напряжений подставляются:

- при ($u = 1$) $\rightarrow P=P_1, M=M_1, F=F_1$;
- при ($u = 3$) $\rightarrow P_3=0, M=M_3, F=F_3$.

Затем рассчитываются эквивалентные напряжения на наветренной и подветренной сторонах для ($u = 1$) и ($u = 3$) по формулам

$$\sigma_{E1} = \sqrt{\sigma_{X1}^2 - \sigma_{X1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2},$$

$$\sigma_{E2} = \sqrt{\sigma_{X2}^2 - \sigma_{X2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2}.$$

Производится проверка прочности:

- на наветренной стороне по формуле $\max\{\sigma_{X1}; \sigma_{E1}\} \leq [\sigma]_{kv} \varphi$;
- на подветренной стороне по формуле $\max\{\sigma_{X2}; \sigma_{E2}\} \leq [\sigma]_{kv} \varphi$

В случаях, когда σ_{X1} и/или σ_{X2} - сжимающие напряжения, значение φ в формулах принимают $\varphi = 1,0$.

Если условия прочности не выполняются, то необходимо увеличить толщину стенки корпуса и повторить расчет.

Расчет опорной обечайки

Опорную обечайку проверяют на прочность и устойчивость для рабочего условия ($u=1$) и условия испытания ($u=2$).

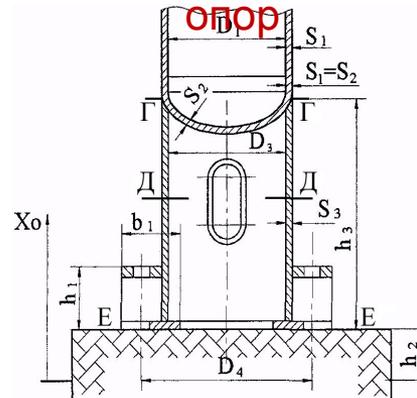
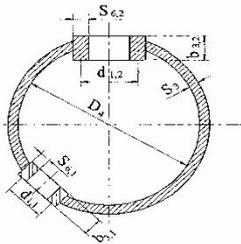
Расчет опорной обечайки заключается в выборе стандартной опоры и проверке:

- **прочности сварного шва**, соединяющего корпус колонны с опорной обечайкой в сечении Г-Г;
- **устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия** (сечение Д-Д).

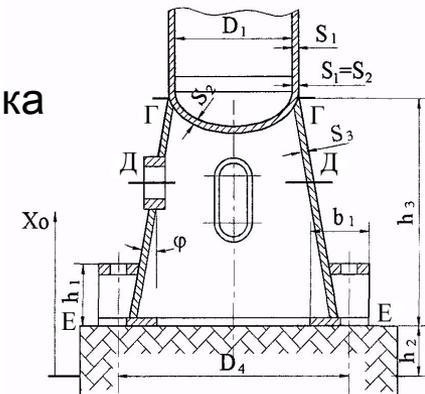
Прежде чем рассчитывать опорную обечайку, необходимо выбрать тип опоры.

Конструкции юбочных

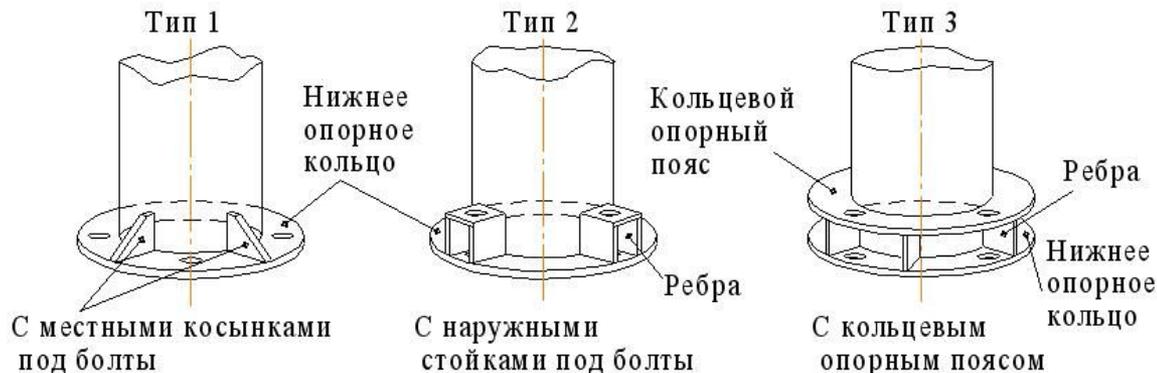
Цилиндрическая опорная обечайка



Коническая опорная обечайка



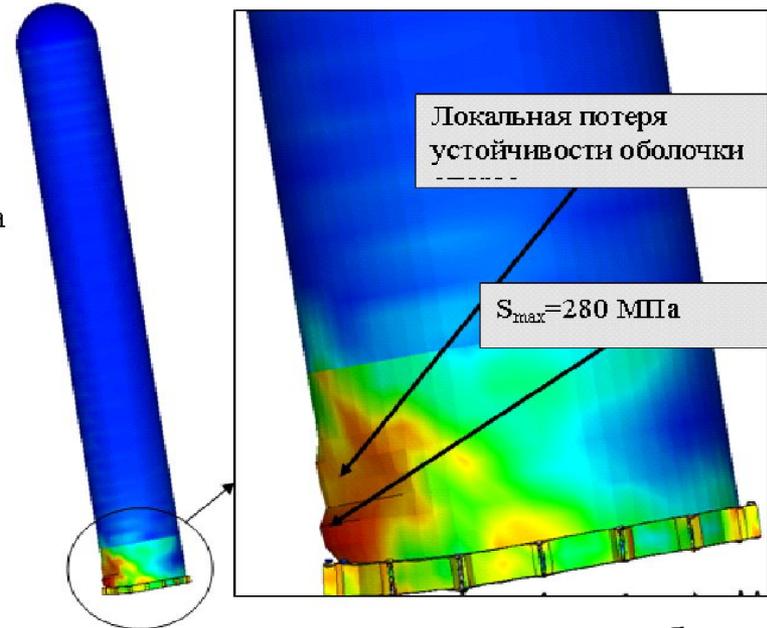
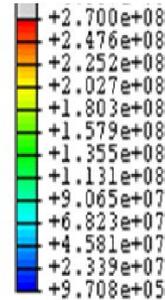
Типы юбочных цилиндрических опор



Проверка устойчивости опорной обечайки

Модель потери устойчивости опорной обечайки под действием изгибающего момента, возникающего от ветровой нагрузки

Напряжения, Па



Проверка устойчивости опорной обечайки с одним отверстием (в данной работе рассматривается опорная обечайка без кольцевого шва с одним отверстием - лазом) проводится **для сечения Д-Д**, проходящего через середину отверстия **для рабочих условий (u = 1)** и **для условий испытаний (u = 2)** по формуле

$$\frac{F}{\Psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \Psi_3 \cdot D_0}{\Psi_2 \cdot [M]} \leq 1.0$$

где D_0 – диаметр опорной обечайки, мм;

F, M – расчетная осевая сжимающая сила и изгибающий момент, определяемые в сечении Д-Д при (u=1) и (u = 2), Н, Н·м

$[F], [M]$ – соответственно допускаемая осевая сжимающая сила и изгибающий момент, Н, Н·м;

Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 – коэффициенты, определяемые по формуле

$$\Psi_1 = \frac{A}{\pi \cdot D_0 (S_0 - C)}; \Psi_2 = \frac{4W}{\pi \cdot D_0^2 (S_0 - C)}; \Psi_3 = \frac{Y}{D_0},$$

где A, W, Y – соответственно площадь, м², наименьший момент сопротивления, м³, и координата центра тяжести, м, наиболее ослабленного поперечного сечения.

Методика определения допускаемой осевой сжимающей силы

Согласно ГОСТ Р 52857.2-2007 допускаемое сжимающее усилие $[F]$ определяется по формуле

$$[F] = \frac{[F]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{п}}}{[F]_{\text{Е}}}\right)^2}}$$

где $[F]_{\text{п}}$ - допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности вычисляют по формуле

$$[F]_{\text{п}} = \pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot [\sigma]$$

$[F]_{\text{Е}}$ - допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости вычисляют по формуле

при $\frac{l_{\text{п}}}{D} > 10$

$$[F]_{\text{Е}} = \min \{ [F]_{\text{Е}_1}; [F]_{\text{Е}_2} \}$$

при $\frac{l_{\text{п}}}{D} < 10$

$$[F]_{\text{Е}_1} = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right]^{2,5}$$

$$[F]_{\text{Е}_2} = \frac{\pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2,$$

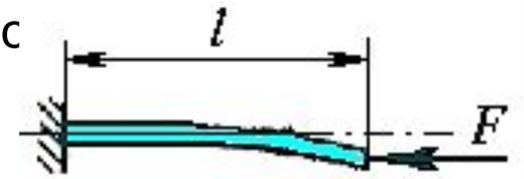
$$[F]_{\text{Е}} = [F]_{\text{Е}_1}$$

$$[F]_{\text{Е}_1} = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right]^{2,5}$$

где $\lambda = \frac{2,825 \cdot 10^4}{(D + S - C) \cdot l_{\text{п}}}$ - гибкость оболочки; приведенную расчетную длину $l_{\text{п}}$ принимают по таблице.

В учебных расчетах принимаем, что для колонного аппарата, расчетная схема которого представляет упруго-защемленный с

$l_{пр} = 2l_p = 2H$, где H – высота колонны, м.



Потеря устойчивости под действием изгибающего момента

Если обечайки нагружены изгибающим моментом, то допускаемый изгибающий момент следует рассчитывать по формуле

$$[M] = \frac{[M]_{пр}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{пр}}{[M]_{Е}}\right)^2}}$$

где $[M]_{пр}$ – допускаемый изгибающий момент из условия прочности, Н·м, который рассчитывается по формуле

$$[M]_{пр} = \frac{\pi}{4} \cdot D \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot [\sigma] = \frac{\pi}{4} [F]_{пр}$$

$[M]_{Е}$ – допускаемый изгибающий момент, Н·м, из условия устойчивости в пределах упругости рассчитывается по формуле

$$[M]_{Е} = \frac{89 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D^3 \cdot \left[\frac{100(S - C)}{D} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100(S - C)}{D}} = \frac{D}{3,5} \cdot [F]_{E1}$$

Расчет элементов нижнего опорного узла

Расчет нижнего опорного узла заключается:

- в выборе марки бетона для фундамента;
- определении ширины нижнего опорного кольца из условия, чтобы напряжения сжатия, передаваемые от него на фундамент, были меньше допустимых;
- проверке на прочность и устойчивость всех элементов опорного узла (верхнего и нижнего опорных колец, ребер, опорной обечайки в месте соединения с верхним опорным элементом) при заданных их размерах.

Определение ширины нижнего опорного кольца опоры, устанавливаемого на бетонном фундаменте

Расчет элементов опорного узла следует проводить для рабочего условия ($u = 1$) и условия испытания ($u = 2$) в сечении Е-Е. Расчет заключается в проверке прочности бетона в сечении Е-Е под суммарным воздействием F и M_u .

Для этого находится расчетная ширина нижнего опорного узла b_{1R}

$$b_{1R} = \frac{\frac{4M_u}{D_B} + F}{\pi \cdot D_B \cdot [\sigma]_B}$$

где D_B – диаметр окружности анкерных болтов, принимаемый в соответствии со справочными таблицами, мм;

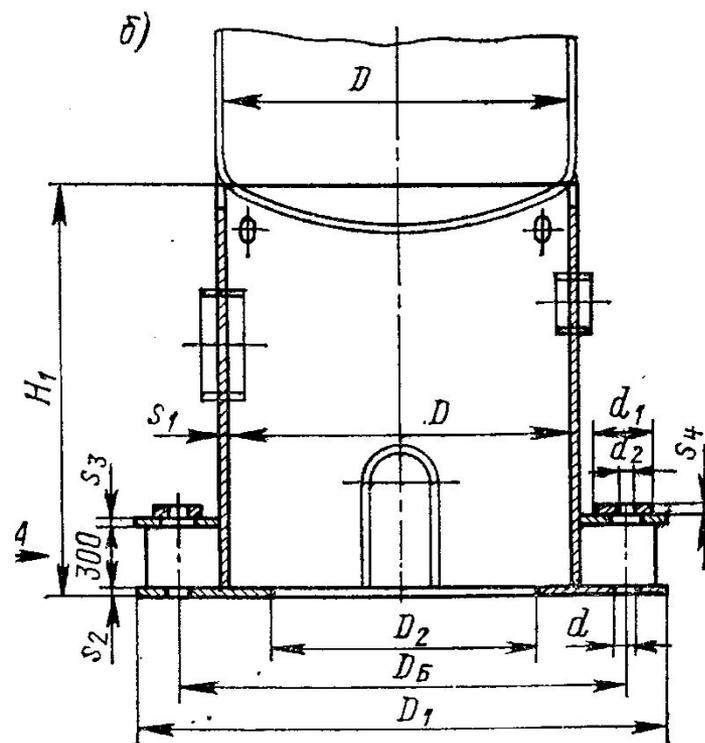
$[\sigma]_{бет}$ – допустимое напряжение бетона на сжатие, МПа, выбирается из таблицы.

Затем конструктивное значение ширины нижнего опорного кольца b_1 сравнивается с расчетным значением b_{1R}

$$b_1 = D_1 - D_2 \geq b_{1R}$$

где D_1 , D_2 – соответственно, наружный и внутренний диаметры нижнего опорного кольца, мм.

Если конструктивное значение ширины окажется меньше, чем расчетная величина, то необходимо увеличить ширину опорного кольца или выбрать другую марку бетона и весь расчет повторить



Расчет анкерных болтов

Расчет прочности анкерных болтов производится для сечения Е-Е для условий монтажа ($u = 3$), поскольку именно в этих условиях аппарат имеет наименьший вес и, соответственно, осевую сжимающую силу и положительные напряжения от изгибающего момента могут превысить отрицательные напряжения от осевой сжимающей силы, и часть болтов будет работать на растяжение, что может привести к их разрыву.

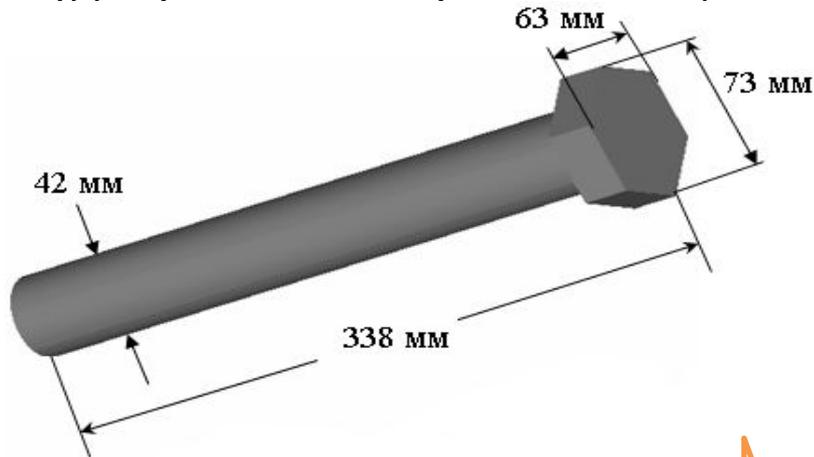
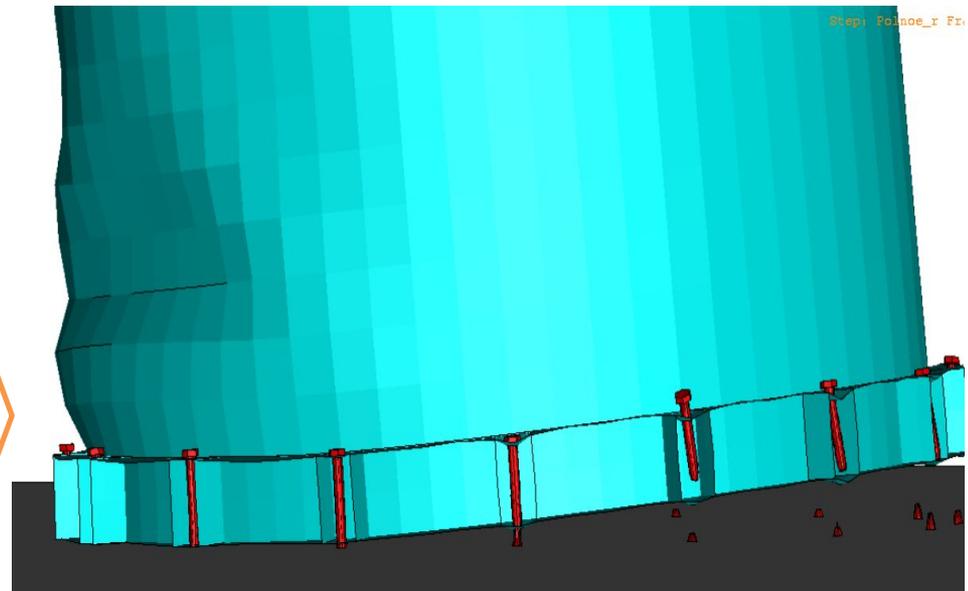


Схема анкерного болта

Болты в правой части опоры воспринимают растягивающие напряжения, в левой части наблюдается местная потеря устойчивости

$$M_3 > 0.44F_3D_B$$



При расчете анкерных болтов определяют, работают ли они под нагрузкой (воспринимают растягивающие напряжения), или служат только для фиксации аппарата, по соотношению

$$M_3 > 0,44 F_3 D_B$$

$$M_3 \leq 0,44 F_3 D_B$$



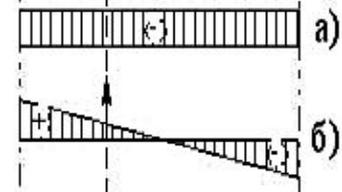
Эпюры меридиональных напряжений только от воздействия:

а) осевой сжимающей силы F

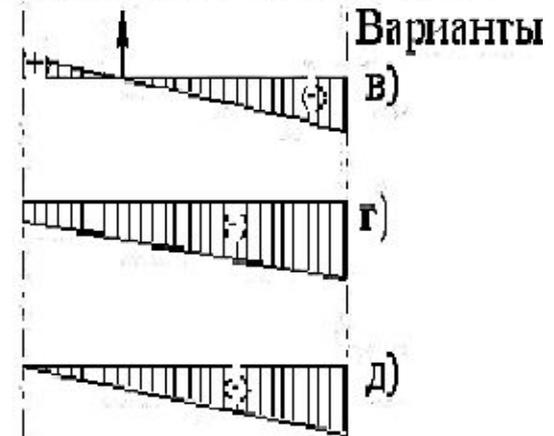
б) изгибающего момента в сечении E-E - M_v^{E-E}

$$\sigma_{m(x1)} = F/A$$

$$\sigma_{m(x1)} = M_v^{E-E} / W$$



Три варианта суммарных эпюр напряжений в сечении E-E



Если $M_3 > 0,44 \cdot F_3 \cdot D_B$, необходимо проводить расчёт болтов на прочность

Если $M_3 \leq 0,44 \cdot F_3 \cdot D_B$, болты служат только для фиксации, не рассчитываются, а выбираются конструктивно

Напряжения $\sigma_{m(x1)}$ от $M_v^{E-E} >$, чем напряжения $\sigma_{m(x1)}$ от F

Напряжения $\sigma_{m(x1)}$ от $M_v^{E-E} <$, чем напряжения $\sigma_{m(x1)}$ от F

Напряжения $\sigma_{m(x1)}$ от $M_v^{E-E} =$ напряжения $\sigma_{m(x1)}$ от F

Если $M_3 \leq 0.44F_3D_B$

В этом случае болты не рассчитываются, а их диаметр и количество принимаются конструктивно по следующим рекомендациям:

- число болтов должно быть не менее 4 при M24 – для колонн $D_1 < 1400$ мм;
- число болтов должно быть не менее 6 при M30 – для колонн $1400 < D_1 \leq 2200$ мм.
- при $D_1 > 2200$ мм болты диаметром M36 мм устанавливают с шагом 1200 мм, но во всех случаях число болтов должно быть не менее 12.

Если $M_3 > 0.44F_3D_B$

то положительные напряжения (σ_M) от изгибающего момента M_3 в сечении Е-Е больше, чем отрицательные напряжения (σ_F) от осевой сжимающей силы F_3 , часть болтов работает на растяжение, может произойти их разрыв и их необходимо рассчитать на прочность.

В этом случае определяется внутренний диаметр резьбы d_B рас анкерных болтов по формуле

$$d_{B\text{рас}} = x_B \sqrt{\frac{M_3 - 0,44F_3D_B}{n[\sigma]_{\text{бол}} D_B} + C}$$

$$d_B \leq d_{B\text{рас}}$$

Условие прочности болта где $n = z_B$ – число болтов;

$[\sigma]_{\text{бол}}$ – допускаемое напряжение материала анкерных болтов, МПа,
 D_B – диаметр болтовой окружности, мм.