

Общие сведения о пластинах и оболочках

К тонкостенным сосудам давления относят аппараты, работающие под давлением не более 10 МПа. Толщина стенки корпуса такого аппарата не превышает 10 % его внутреннего диаметра.

Причины, по которым аппараты подразделяются на тонко- и толстостенные

1) отличие напряженных состояний материала оболочек:

- для тонкостенных – двухосное ($\sigma_r \approx 0$; $\sigma_m \neq 0$; $\sigma_t \neq 0$);
- для толстостенных – объемное ($\sigma_r \neq 0$; $\sigma_m \neq 0$; $\sigma_t \neq 0$);

2) различный характер распределения тангенциальных напряжений по толщине стенки:

- для тонкостенных - равномерное;
- для толстостенных - неравномерное.

Основные признаки деления сосудов на тонко- или толстостенные

Основными признаками деления сосудов на тонко- и толстостенные являются:

- соотношение толщины стенки S к внутреннему диаметру $D_{в.}$;
- значение давлений.

Например, для цилиндрических обечаек

- **для тонкостенных:**

$$а) \frac{S - C}{D_{в.}} \leq 0,1 \text{ (при } D_{в.} > 200 \text{ мм) или } \beta = \frac{D_{н.}}{D_{в.}} < 1,2 \text{ ,}$$

где β - коэффициент толстостенности;

б) $P \leq 10 \text{ МПа}$ (условное разделение);

- **для толстостенных:**

$$а) \frac{S - C}{D_{в.}} > 0,1 \text{ , } \beta > 1,2 \text{ ;}$$

б) $P > 10 \text{ МПа}$.

Условие тонкостенности

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{S-c}{D_B} \leq 0,1 \\ \frac{S-c}{D_B} \leq 0,3, \end{array} \right.$$

для обечаек и труб при $D_B \geq 200$ мм

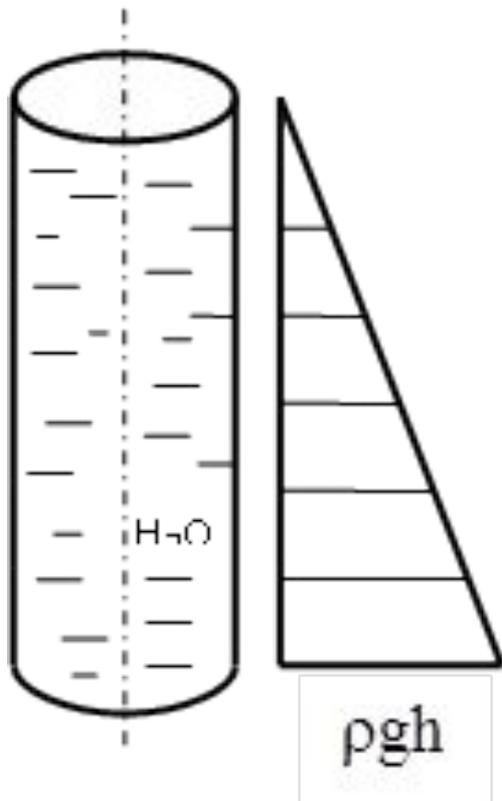
для обечаек и труб при $D_B < 200$ мм

где c - сумма прибавок, мм.

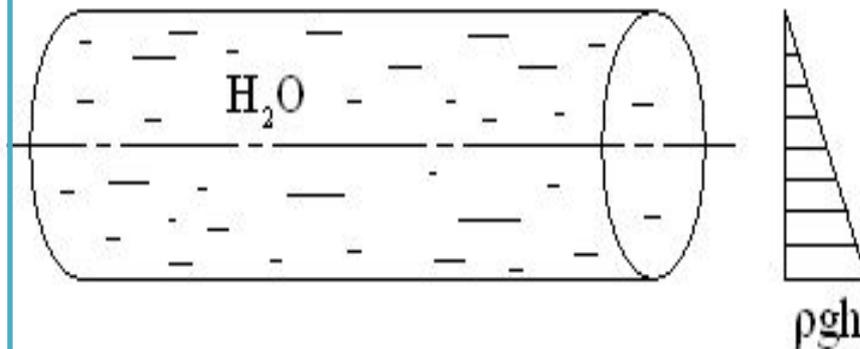
Основные определения

- **Оболочкой** называется тело, два размера которого значительно больше третьего (толщины стенки S).
- **Оболочкой вращения** называется оболочка, образованная вращением какой-либо плоской кривой вокруг оси, лежащей в ее плоскости.
- Если срединная поверхность оболочки является плоскостью, то такую оболочку называют **пластиной**.
- Воображаемую поверхность, равноотстоящую от обеих ограничивающих поверхностей, называют **срединной поверхностью**

Осесимметрично нагруженная оболочка



Не осесимметрично нагруженная оболочка

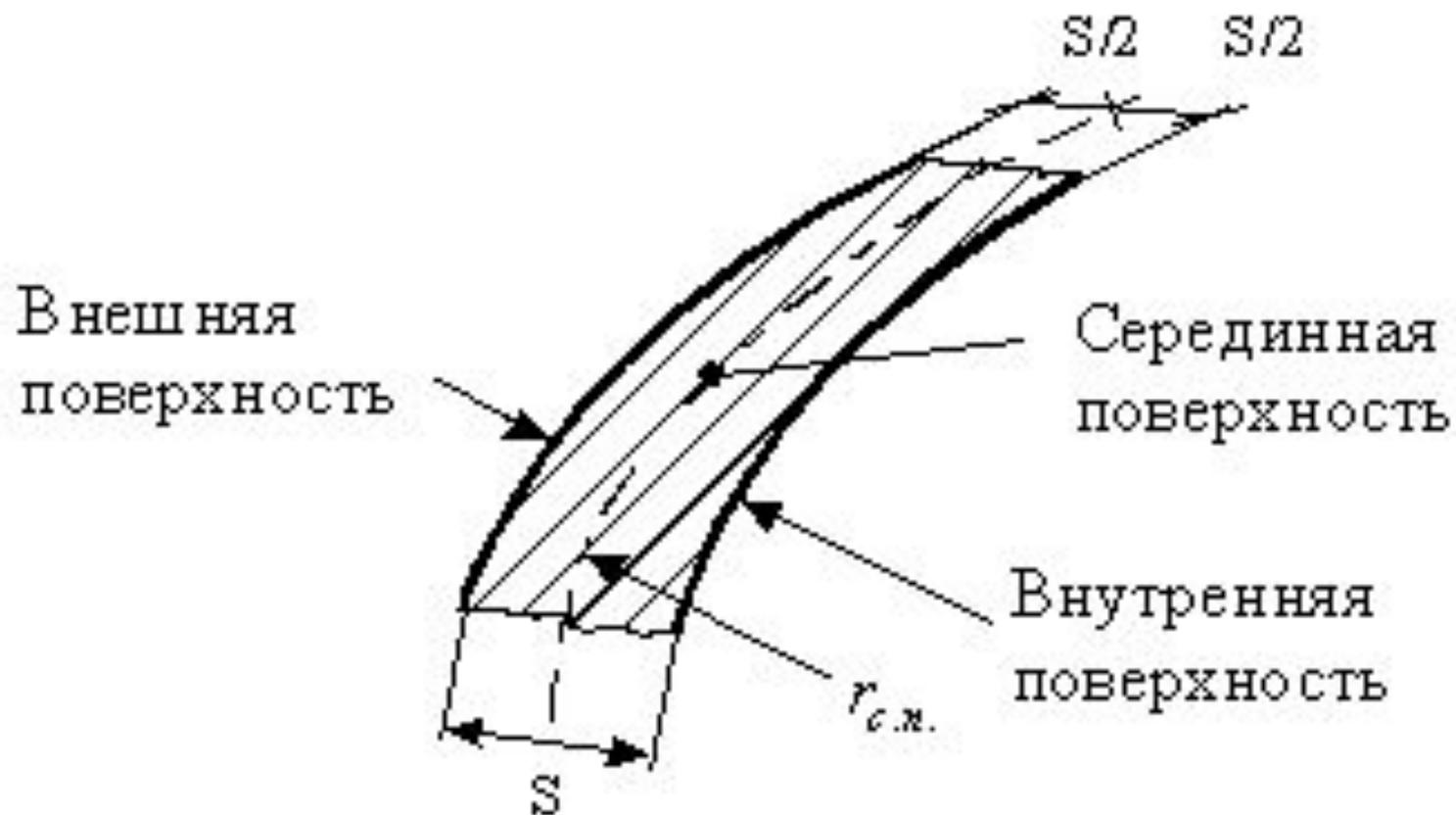


Основные параметры оболочки вращения

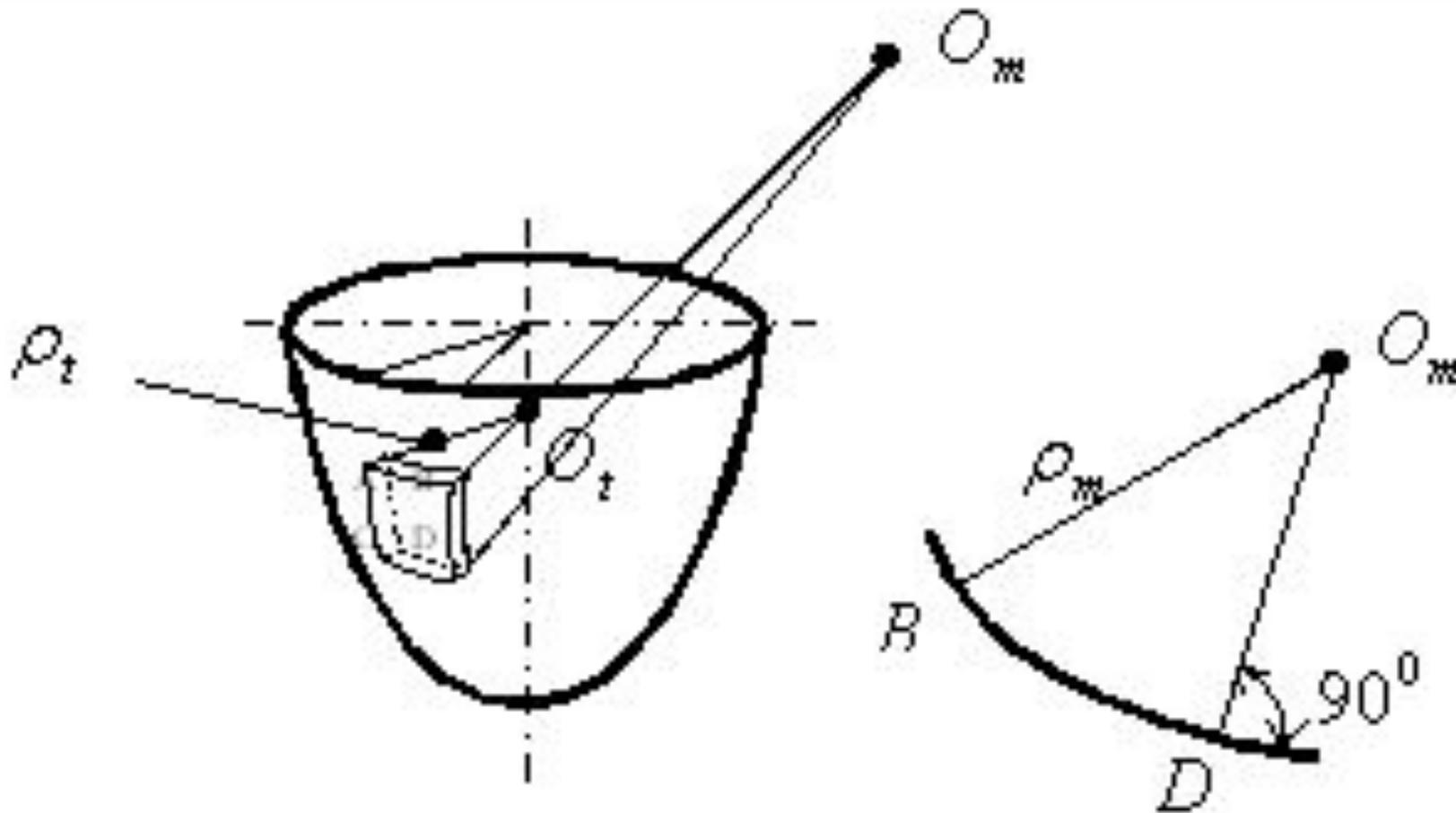


- **Меридианами** называются кривые, образованные пересечением срединной поверхности плоскостями, проходящими через ось симметрии оболочки.
- **Параллелями** (параллельными кругами или кольцевыми сечениями) называются окружности, образованные пересечением срединной поверхности плоскостью, перпендикулярной оси оболочки.
- **Полюсом** оболочки называется точка пересечения срединной поверхности с осью.
- Параметры ρ_m , ρ_t называются **радиусами кривизны** соответственно меридиана и параллельного круга.

Срединная поверхность



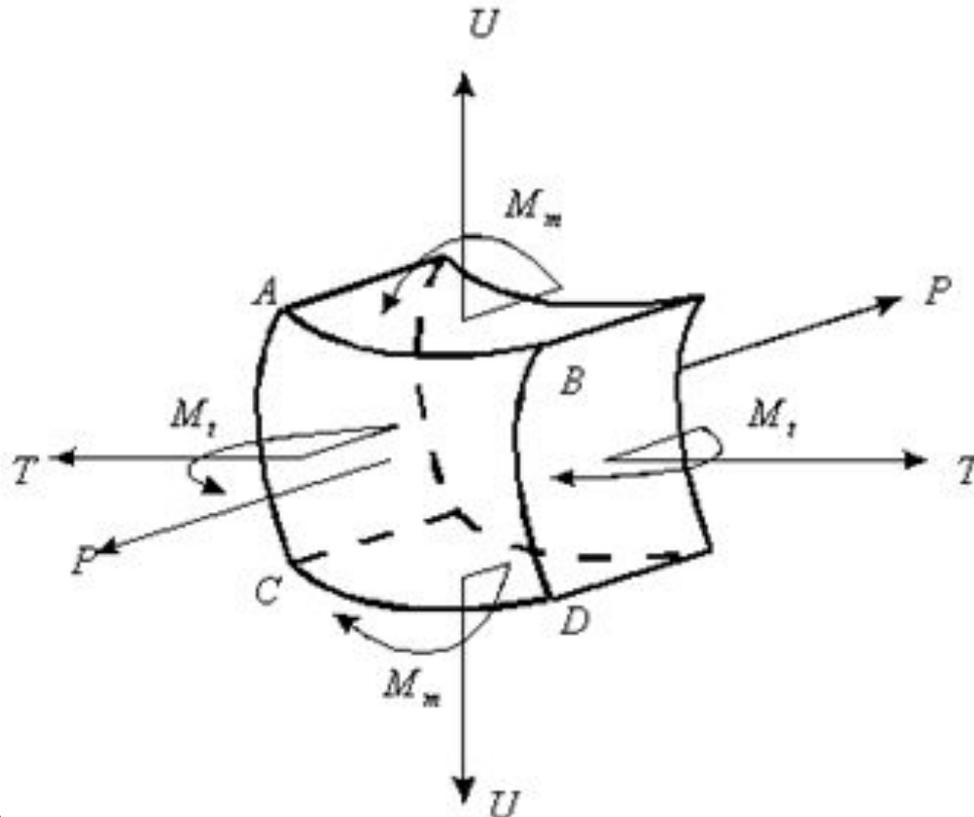
Радиусы кривизны меридиана и параллельного круга



Безмоментная теория расчета тонкостенных оболочек

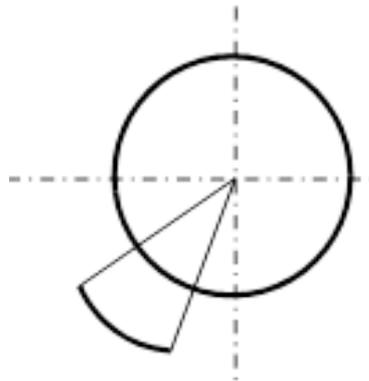
Внутренние силовые факторы

(ДСФ)



- T, U – тангенциальные и меридиональные растягивающие усилия;
- M_t, M_m – тангенциальный и меридиональный изгибающий моменты;
- P – усилие от давления.

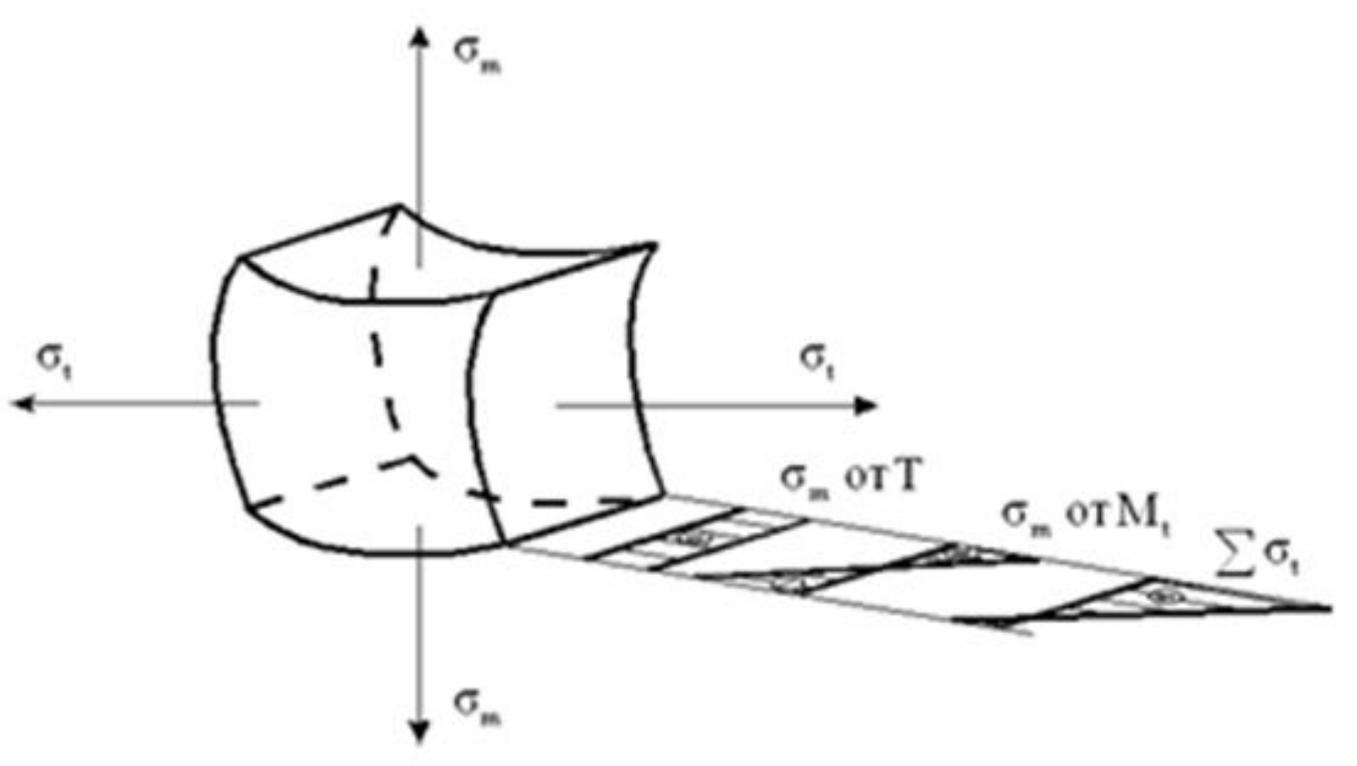
Деформации сферической оболочки



- Допустим, надули шарик до давления P_1 и он принял определенный размер, характеризующийся длиной окружности поперечного сечения.
- Надуваем шарик до давления $P_2 > P_1$, размеры шарика увеличиваются и, соответственно, изменяются размеры дуги АВ.
- Из рисунка видно, что дуги не совпадут, так как, во-первых, одна дуга длиннее другой, т.е. на нее должны действовать растягивающие усилия, в данном случае тангенциальные – T , а во-вторых, различна их кривизна.
- Изменить свою кривизну дуга может только под действием изгибающих моментов.
- Таким образом, В оболочках под действием внутреннего давления возникают усилия U и T и изгибающие моменты M_t , M_m .
- **В случае, когда вдоль меридиана не будет резких изменений внешней нагрузки, толщины оболочки и ее радиусов кривизны, то можно принять, что оболочка не подвергается изгибу, т.е. изгибающие моменты и поперечная сила равны нулю ($M_x = M_y = Q_x = 0$), благодаря же симметрии формы и нагрузки оболочки действие крутящих моментов M_z и поперечной силы Q_x на всех гранях исключено и тогда z касательные напряжения отсутствуют**

Напряженное состояние и эпюры распределения напряжений по толщине стенки

- Распределение напряжений по толщине
стенки - постоянное



Основное допущение безмоментной теории

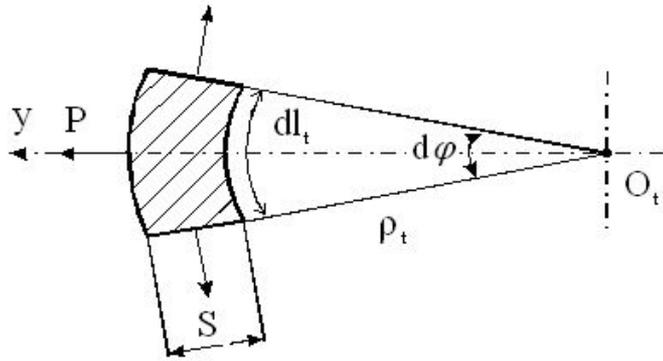
Таким образом, по граням действуют только **нормальные усилия N** ; будем называть их соответственно меридиональными и обозначать $N = U$ (по меридиональным сечениям АВ и СД) и тангенциальными (кольцевыми) $N = T$ (по граням АС и ВД). От них возникают нормальные напряжения, соответственно:

- меридиональные σ_m
- тангенциальные σ_t

Напряженное состояние тонкостенных оболочек - плоское

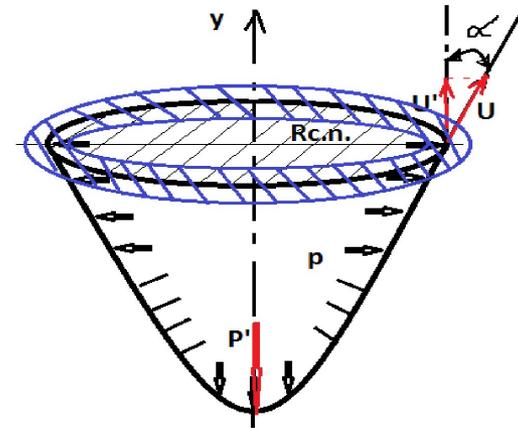
- Так как **для тонкостенных оболочек** внутреннее давление обычно **меньше 10 МПа**, то радиальное напряжение σ_r также не больше этого значения, и соответственно, значительно меньше допускаемых напряжений. Поэтому для тонкостенных оболочек обычно пренебрегают величиной радиальных напряжений и **принимают их равными нулю**.
- Таким образом, можно принять, что напряженное состояние тонкостенных оболочек – **плоское (двухосное)**.

Уравнение Лапласа



$$\frac{\sigma_t}{\rho_t} + \frac{\sigma_m}{\rho_m} = \frac{P}{S}$$

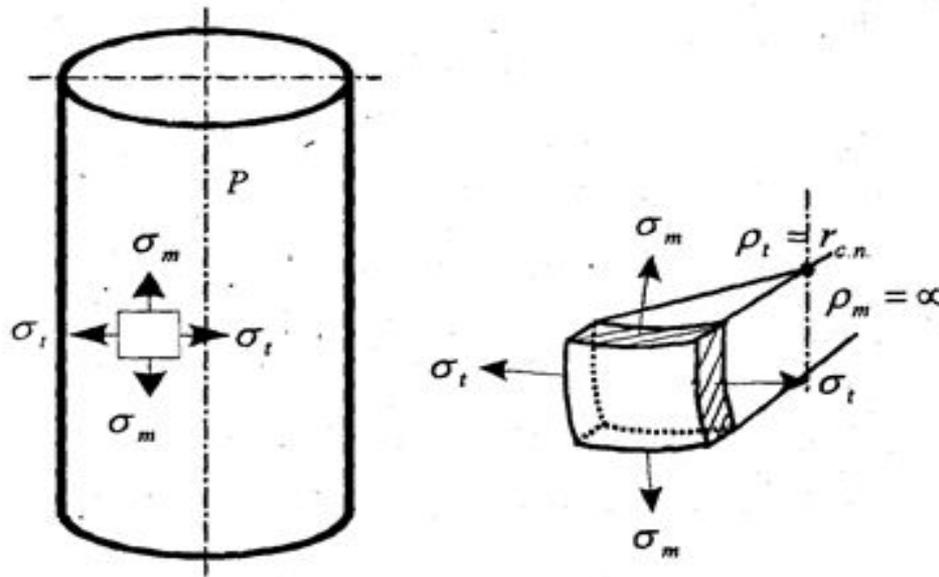
Уравнение равновесия зоны



$$\sigma_m = \frac{P \cdot R_{c.n.}}{2S \cos \alpha}$$

Формулы
напряжений для
различных оболочек

Для цилиндрической оболочки:



$$\rho_t = R, \rho_m = \infty, \alpha = 0, \cos 0 = 1$$

$$\sigma_m = \frac{P \cdot R_{cн}}{2 \cdot S}$$

$$\sigma_t = \frac{P \cdot R_{cн}}{S}$$

$$\sigma_t = 2 \cdot \sigma_m$$

Определение напряжений и толщины стенки в цилиндрической оболочке

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma]$$

где $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное напряжение, МПа;

σ_1, σ_3 – главные напряжения, МПа, т.е. нормальные напряжения, действующие на площадках, где касательные напряжения (τ) равны нулю;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение, МПа, которое определяется по справочным таблицам в зависимости от материала и расчетной температуры. Учитывая, что для цилиндрической оболочки $\sigma_1 = \sigma_t$, $\sigma_2 = \sigma_m$, $\sigma_3 = \sigma_t$, а из курса сопротивления материалов известно, что принимаем

$$\sigma_1 = \sigma_t$$

$$\sigma_2 = \sigma_m$$

$$\sigma_3 = \sigma_t$$

$$\sigma_{\text{3KE}} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma]$$

$$\sigma_{\text{3KE}} = \sigma_t - \sigma_R \leq [\sigma]$$

$$\sigma_t = \frac{P \cdot R_{\text{c.n.}}}{S}$$

$$\frac{P \cdot R_{\text{c.n.}}}{S} - 0 \leq [\sigma]$$

$$\frac{P \cdot (D_B + s)}{S \cdot 2} \leq [\sigma]$$

$$\frac{P \cdot D_B + P \cdot s}{S \cdot 2} \leq [\sigma]$$

$$P \cdot D_B + P \cdot s \leq [\sigma] \cdot 2 \cdot s$$

$$[\sigma] \cdot 2 \cdot s - P \cdot s \geq P \cdot D_B$$

Общая
формула
толщины
стенки

$$S \geq \frac{P \cdot D_B}{2 \cdot [\sigma] - P}$$

Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки по ГОСТ

$$S_R = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P^t_{\text{рас}} \cdot D_E}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_t - P^t_{\text{рас}}} \\ \frac{P^H_{\text{рас}} \cdot D_E}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]^H_{20} - P^H_{\text{рас}}} \end{array} \right\}$$

$$S = S_R + c + c_0$$

где S_R – расчетная толщина стенки, мм;

$S_{\text{ц}}$ – исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки с учетом суммы прибавок, мм, определяемая по ГОСТ;

$P_{\text{рас}}^t$, $P_{\text{рас}}^и$ – расчетные давления соответственно в рабочих условиях и при испытаниях, МПа;

$[\sigma]_t$, $[\sigma]_{20}^и$ – допускаемые напряжения соответственно в рабочих условиях и при испытаниях, МПа;

ϕ – коэффициент прочности сварного шва. Учитывая, что прочность сварного шва может быть меньше, чем прочность основного металла, то уменьшают допускаемое напряжение на величину ϕ , которая зависит от процента контролируемых швов; кроме этого, ϕ зависит от вида сварного шва.

где c_1 – прибавка на коррозию, эррозию, мм, рассчитывается по зависимости

$$C_1 = \pi \cdot \tau ,$$

где π – проникаемость, мм/год. Проницаемость металла определяется экспериментальным путем при исследовании коррозионной стойкости материала в заданной среде, проникаемость принимается равной 0,1 мм/год;

τ – срок службы, год,

Если данных о проникаемости нет, то прибавка на коррозию принимается равной 2 мм;

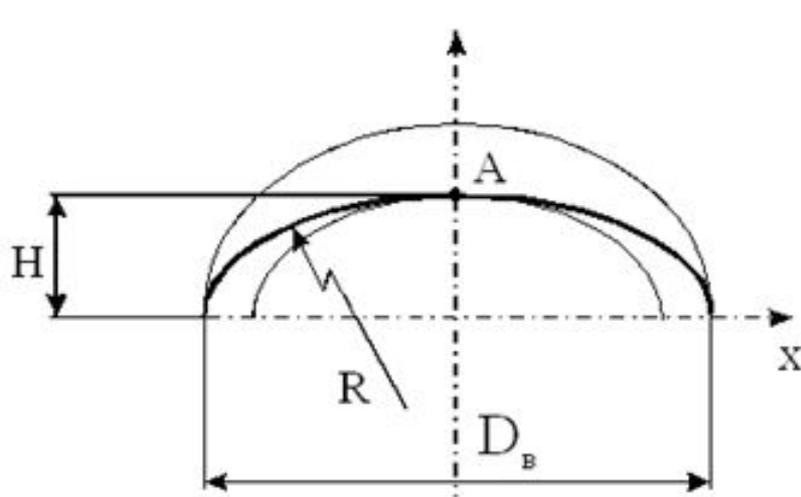
c_2 – прибавка на минусовое отклонение по толщине листа. Эти значения даются в ГОСТах в зависимости от толщины листа, Значения c_2 отрицательные, но в формулы подставляется со знаком плюс;

c_3 – технологическая прибавка, которая возникает в результате изготовления аппарата (вальцовка, штамповка и т. д.). Обычно технологическую прибавку принимают равной нулю ($c_3 = 0$).

c_0 – прибавка на округление толщины стенки до стандартного значения, мм.

Определение толщины стенки и напряжений для оболочек конической формы

- В эллиптической оболочке напряжения и радиусы кривизны в каждой отдельной точке на кривой (образующей эллиптического днища) различны. Они изменяются в зависимости от x и y и максимального своего значения достигают на полюсе.



$$\sigma_t^A = \sigma_m^A = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S}$$

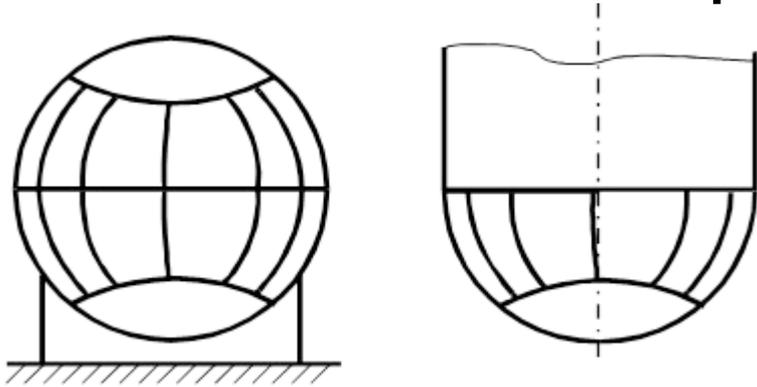
$$R = r^2 \cdot H^2 \cdot \left(\frac{x^2}{r^4} + \frac{y^2}{H^4} \right)^{3/2}$$

- H – глубина днища; R – радиус кривизны; D_B – внутренний диаметр

Толщина стенки эллиптической оболочки:

$$S_R = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{рас}^t \cdot D_B}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_t - 0,5 \cdot P_{рас}^t} \\ \frac{P_{hfc}^H \cdot D_B}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{20}^H - 0,5 \cdot P_{рас}^H} \end{array} \right.$$

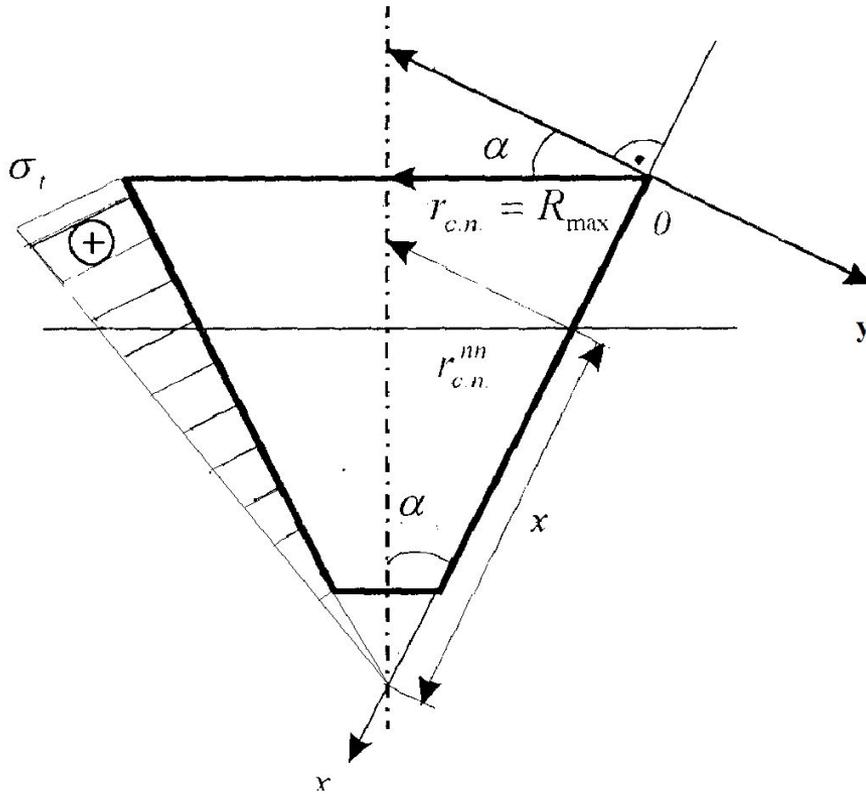
Определение толщины стенки и напряжений для оболочек сферической формы



$$\sigma_m = \sigma_t = \frac{P \cdot R_{\text{сф}}}{2 \cdot S}$$

$$S_R = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{\text{рас}}^t \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_t - 0,5 \cdot P_{\text{рас}}^t} \\ \frac{P_{\text{нфс}}^H \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{20}^H - 0,5 \cdot P_{\text{рас}}^H} \end{array} \right.$$

Определение толщины стенки и напряжений для оболочек конической формы



$$\sigma_t = \frac{P \cdot r_{c.n.}^{nn}}{S \cdot \cos \alpha}$$

$$\sigma_m = \frac{P \cdot r_{c.n.}^{nn}}{2 \cdot S \cdot \cos \alpha}$$

$$\sigma_t = 2 \cdot \sigma_m$$

$\alpha < 80^\circ$,

- Толщина стенки конической оболочки:

$$S_R = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P^t_{\text{рас}} \cdot D_B}{(2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_t - P^t_{\text{рас}}) \cdot \cos \alpha} \\ \frac{P^H_{\text{рас}} \cdot D_B}{(2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{20}^H - P^H_{\text{рас}}) \cdot \cos \alpha} \end{array} \right\}$$

Группа аппарата

Группа	Расчетное давление, МПа	Температура стенки, °С	Рабочая среда
1	Более 0,07 (0,7)	Независимо	Взрывоопасная или пожароопасная или 1-го, 2-го класса опасности
2	Более 0,07 (0,7) До 2,5 (25)	Выше 400	Любая, за исключением указанной для 1-й группы сосудов
	Более 2,5 (25) До 5,0 (50)	Выше 200	
	Более 5,0 (50)	Независимо	
	Более 4,0 (40) До 5,0 (50)	Ниже минус 40	
3	Более 0,07 (0,7) До 1,6 (16)	Ниже 20 От 200 до 400	
	Более 1,6 (16) До 2,5 (25)	До 400	
	Более 2,5 (25) До 4,0 (40)	До 200	
	Более 4,0 (40) До 5,0 (50)	От минус 40 до 200	
4	Более 0,07 (0,7) До 1,6 (16)	От минус 20 до 200	
5а	До 0,07 (0,7)	Независимо	Взрывоопасная или пожароопасная или 1-го, 2-го, 3-го классов опасности
5б	До 0,07 (0,7)	Независимо	Взрывобезопасная или пожаробезопасная или 4-го класса опасности

Объем контроля сварных соединений

Группа аппарата	Объем контроля сварных соединений, %
1, 2	100
3	50
4, 5а	25
5б	10

Значения коэффициента прочности сварных швов

Вид сварного шва (по группам)	Значение коэффициентов прочности сварных швов	
	швов	
	Длина контролируемых швов от общей длины составляет 100%	Длина контролируемых швов от общей длины составляет от 10 до 50%
Стыковой или тавровой с двухсторонним сплошным проваром, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой	1,0	0,9
Стыковой с подваркой корня шва или тавровой с двухсторонним сплошным проваром, выполняемый вручную	1,0	0,9
Стыковой, доступный к сварке только с одной стороны и имеющий в процессе сварки металлическую подкладку со стороны корня шва, прилегающую по всей длине шва к основному металлу (ручная)	0,9	0,8
Стыковой, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой с одной стороны с флюсовой или керамической подкладкой	0,9	0,8
Стыковой, выполняемый вручную с одной стороны	0,9	0,65
Втавр, с конструктивным зазором свариваемых деталей	0,8	0,65

Категории аппаратов

Категория	m, кг	D, мм	L, м
1	120000	3200	48
2	120000	3800	37
3	120000	4000	21
4	240000	3900	22
5	400000	4380	11