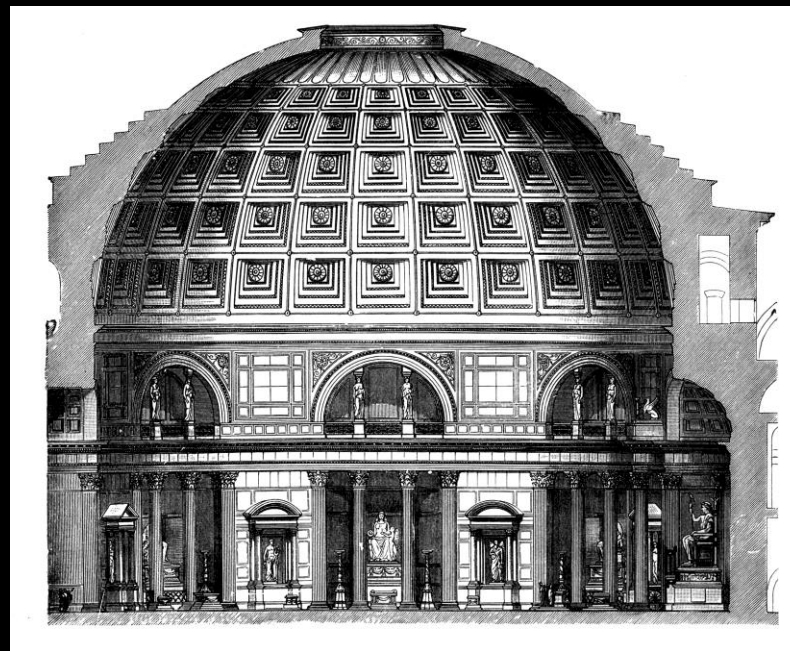


КУПОЛА



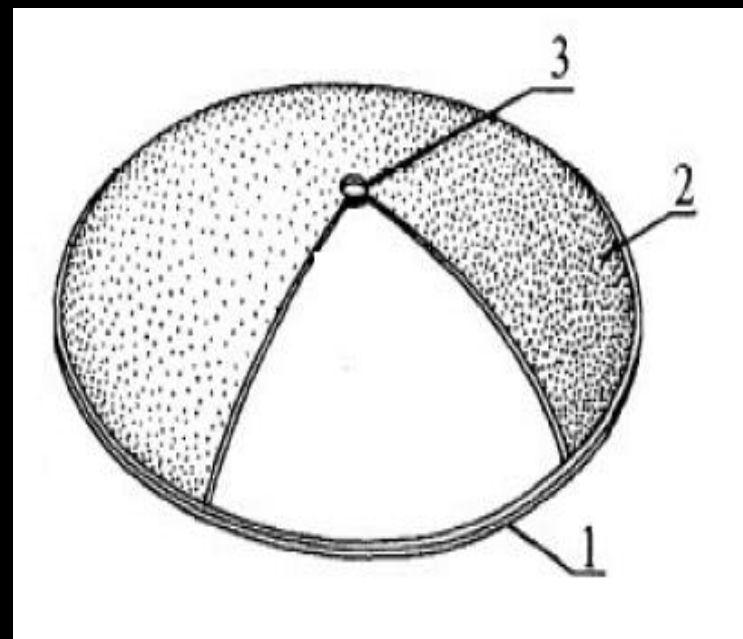
- **Купол** - пространственная конструкция в виде выпуклой оболочки вращения относительно вертикальной оси.

Купола отличаются особенно благоприятными условиями пространственной работы.

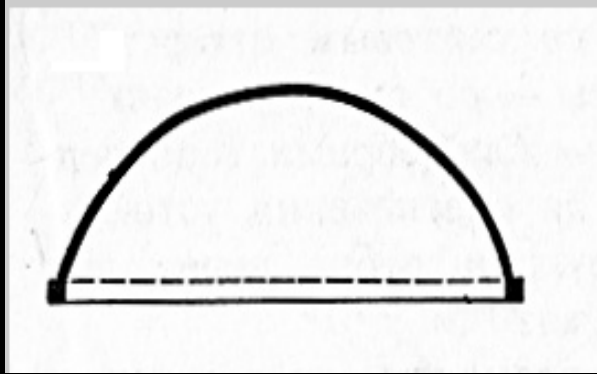
По расходу материалов они экономичней других пространственных покрытий.

Элементы купола:

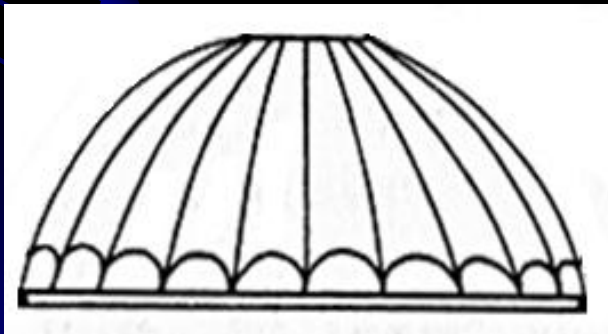
1. растянутое опорное кольцо
2. тонкостенная оболочка
3. сжатое фонарное кольцо



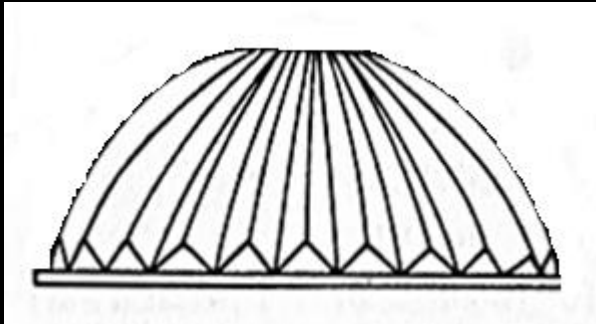
Основные типы куполов



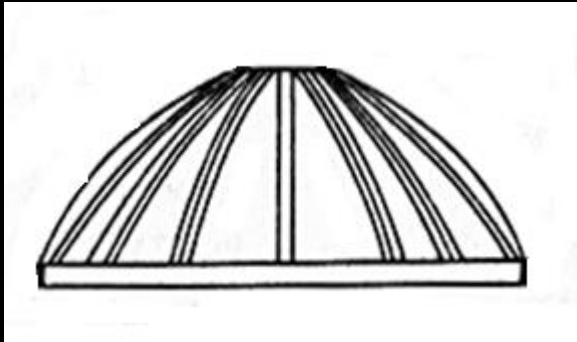
Сплошные или гладкие



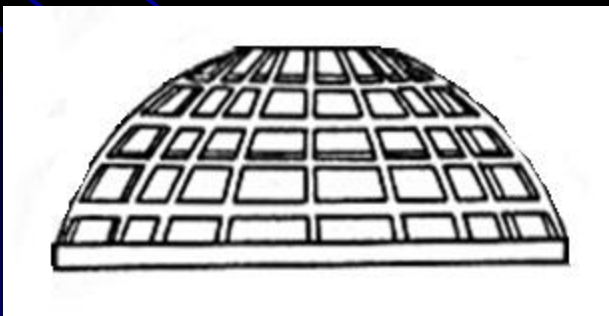
Волнистые



Складчатые



Рибристый

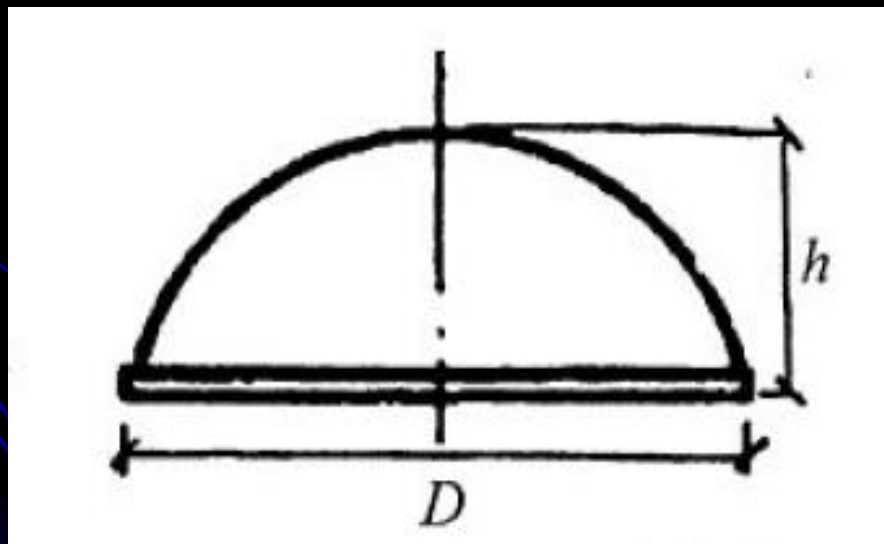


Рибристо - кольцевой

В зависимости от стрелы подъема купола могут быть:

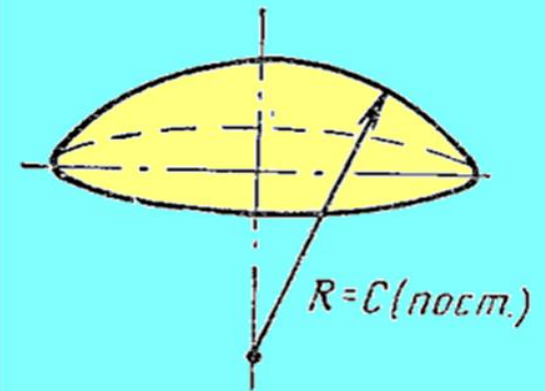
Пологими $\frac{1}{10}D \leq h < \frac{1}{5}D$

Подъемистыми $\frac{1}{5}D \leq h \leq \frac{1}{2}D$

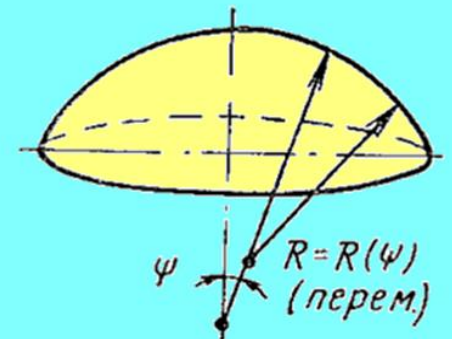


В зависимости от очертания
образующей
оболочки купола могут быть:

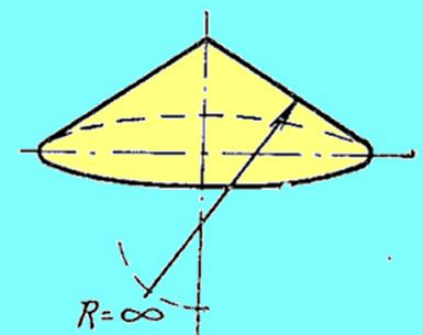
а) Сферическими (шаровой купол)



б) Эллиптическими



в) Коническими

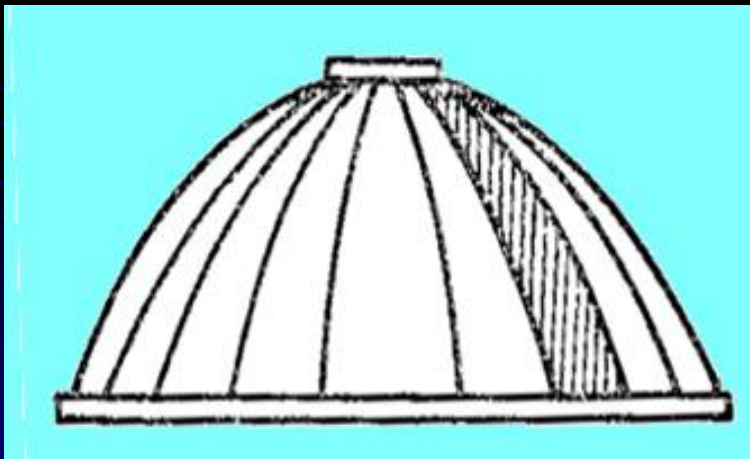


ОБОЛОЧКИ МОГУТ БЫТЬ МОНОЛИТНЫМИ ИЛИ СБОРНЫМИ

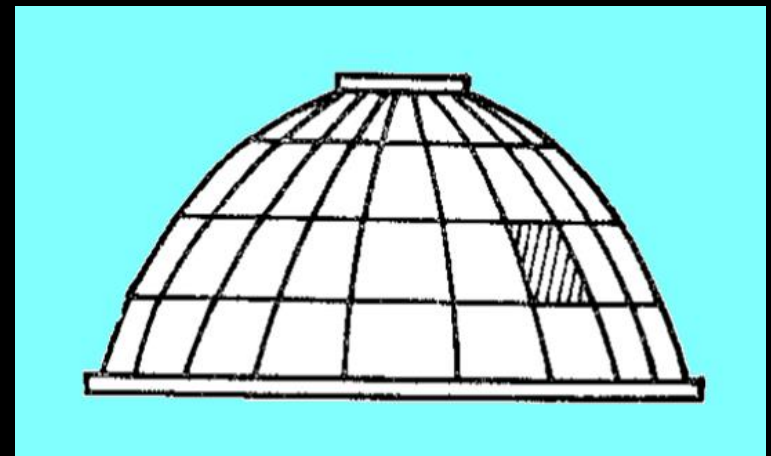
Монолитные оболочки купола, как правило, проектируют гладкими.

Сборные купола делают ребристыми.

Деление производится сечениями:



а) меридиональными



б) меридионально-кольцевыми









Общие положения расчета

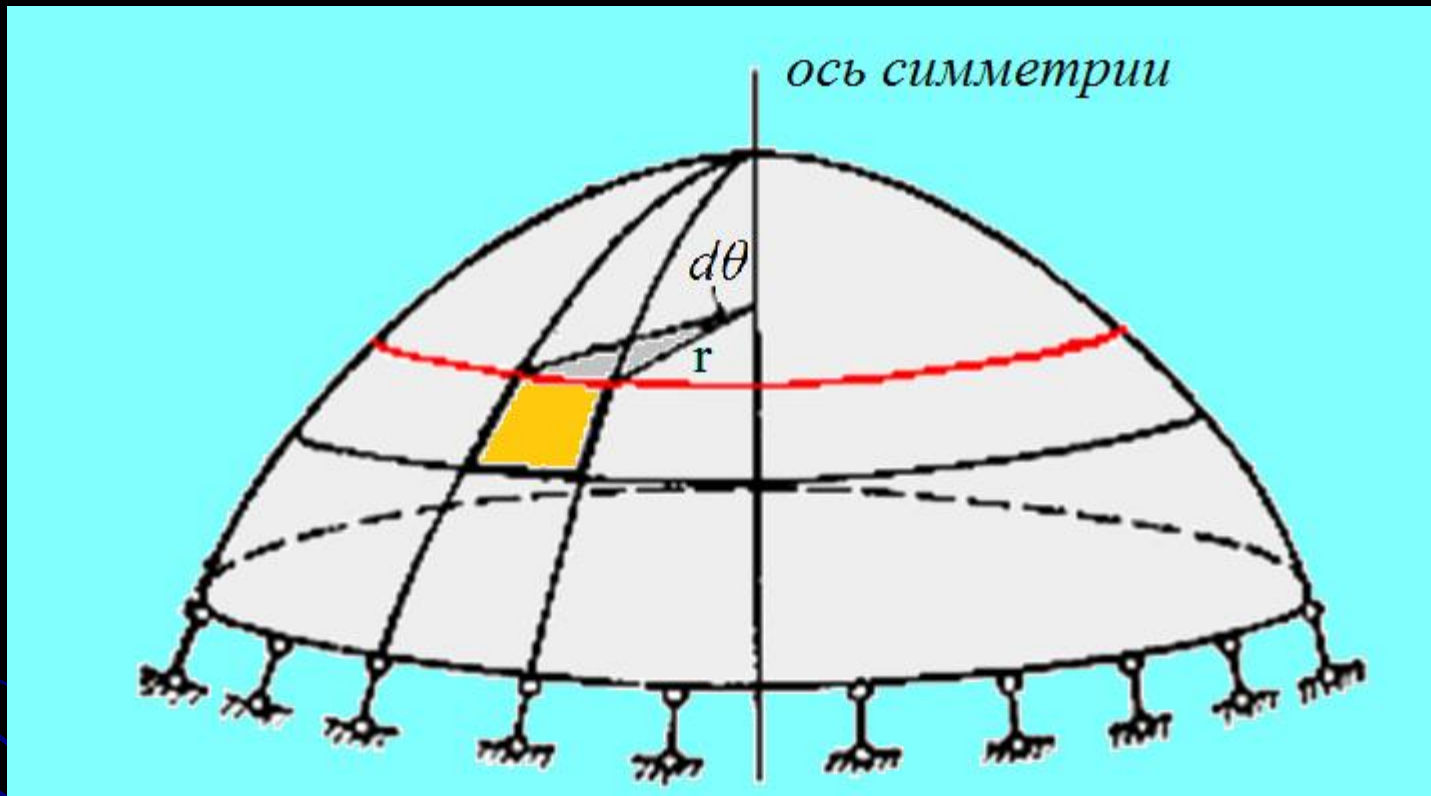
При проектировании куполов усилия можно определять по **безмоментной** теории с наложением усилий краевого эффекта.

Безмоментное напряженное состояние упругой оболочки с вертикальной осью вращения может быть обеспечено при соблюдении следующих условий:

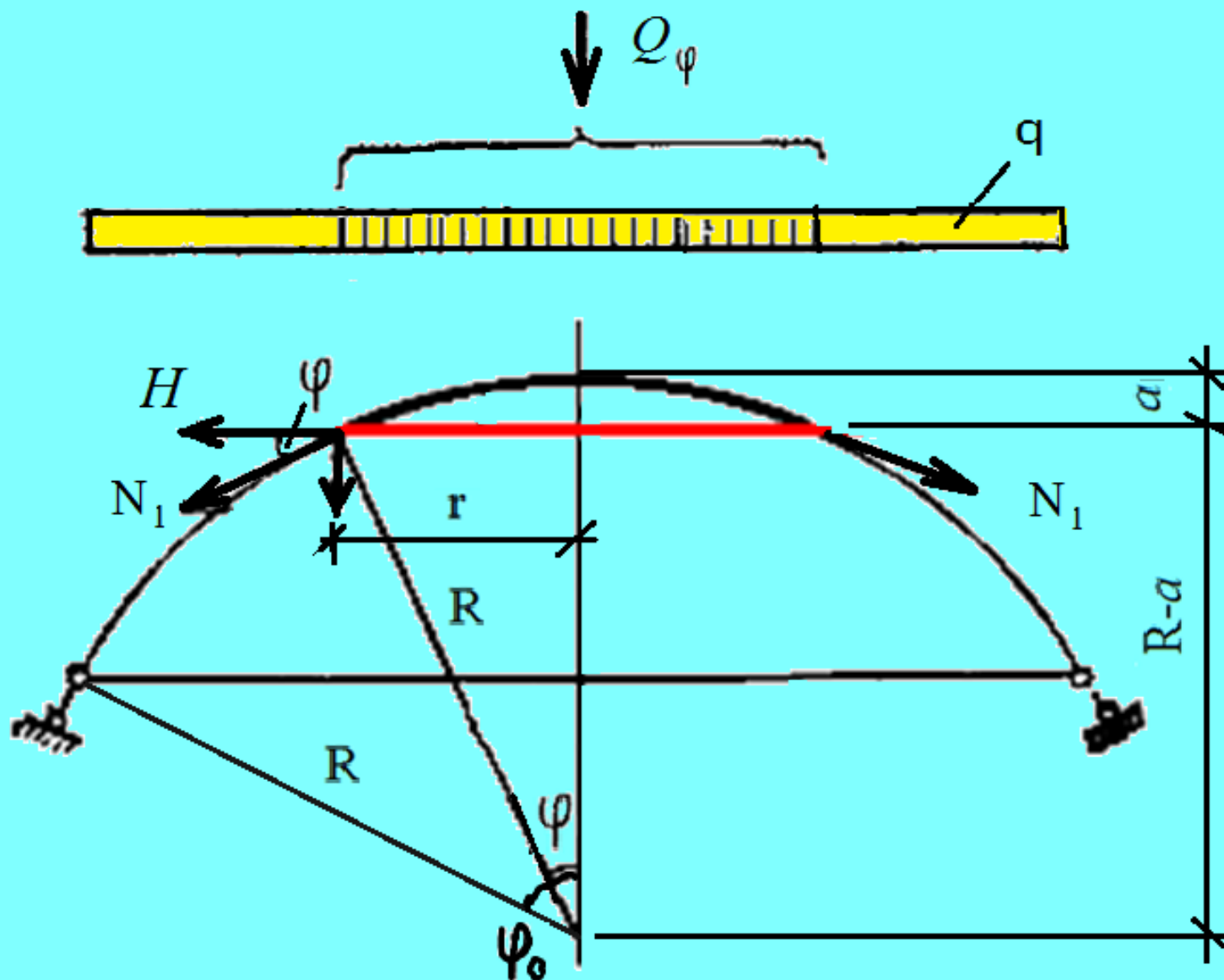
- плавное изменение толщины оболочки и радиуса кривизны;
- действующие на оболочку нагрузки равномерные и симметричные;
- радиальные и угловые перемещения краев оболочки свободные.

В этом случае краевые условия оболочки **статически определимы**,

«Безмоментная» расчетная схема купола

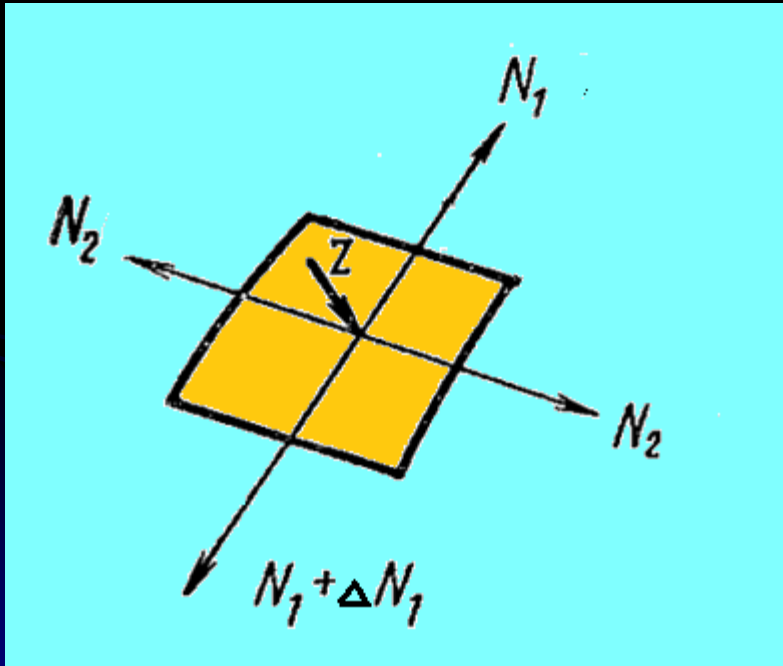


Опираение купола по внешнему контуру представляют как непрерывное, **шарнирно-подвижное**, образованное стерженьками, направленными по касательной к меридиональным сечениям оболочки.



Нагрузка на оболочку осесимметричная

При **осесимметричной** нагрузке в срединной поверхности действуют нормальные усилия, а касательные усилия равны нулю.



N_1 — меридиональное усилие;

N_2 — кольцевое усилие;

Z — нормальная к поверхности оболочки составляющая внешней нагрузки.

Рассмотрим условие равновесия отсеченной части купола.

Сумма проекций на направление оси симметрии:

$$-N_1 \cdot \sin\varphi \cdot 2\pi \cdot r = Q_\varphi$$

Q_φ - суммарная нагрузка, действующая на
отсеченную часть оболочки

r - радиус кольцевого сечения



Меридиональное усилие

$$N_1 = -\frac{Q_\varphi}{2\pi \cdot r \cdot \sin\varphi} \quad (1)$$

Распор

$$H = N_1 \cos\varphi = -\frac{Q_\varphi}{2\pi \cdot r \cdot \operatorname{tg}\varphi}$$

При **безмоментном** состоянии справедливо равенство:

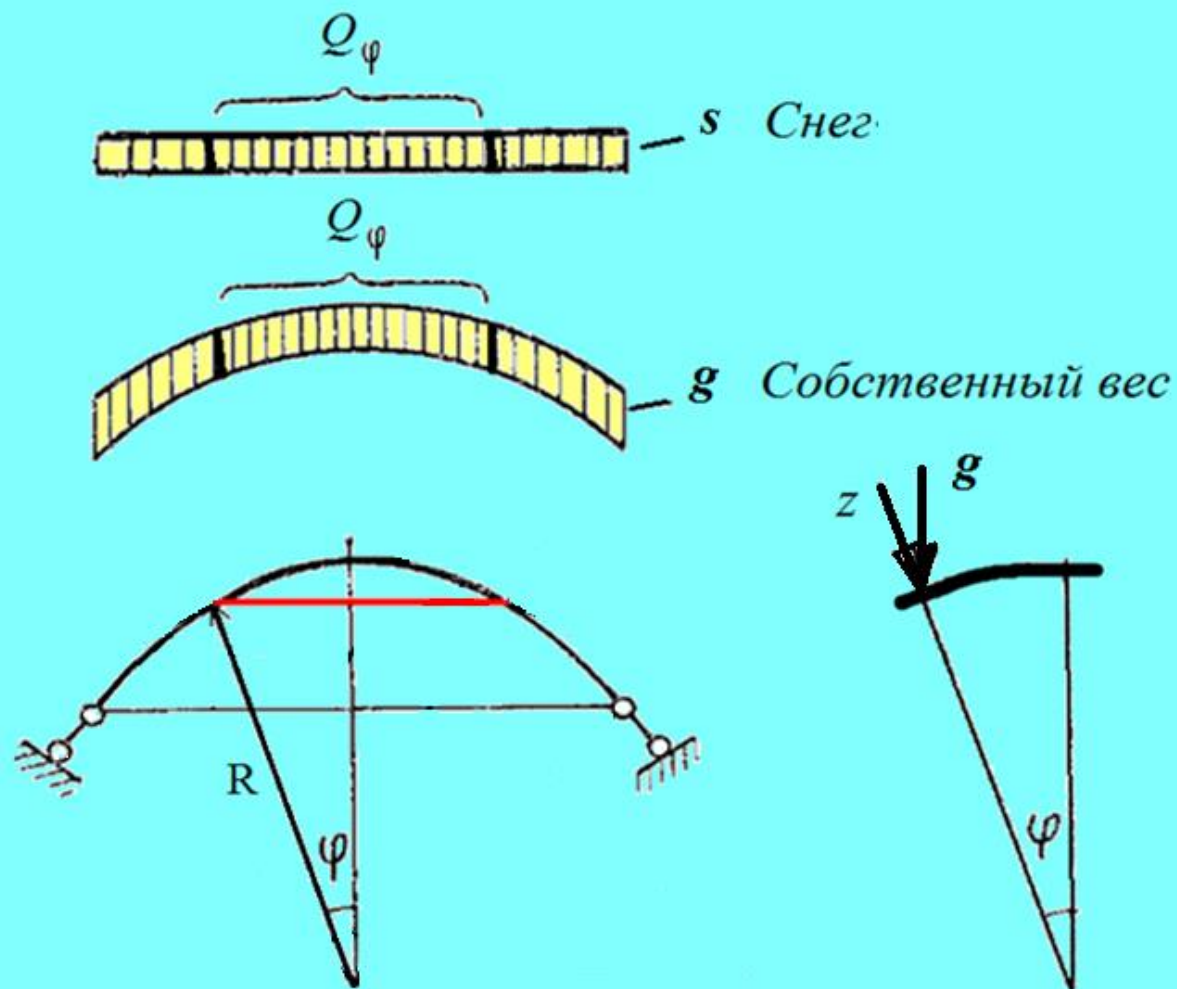
$$\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} = -Z$$

Для сферического купола $R_1 = R_2 = R$, тогда:

$$N_1 + N_2 = -Z \cdot R \quad (2)$$

соответственно $N_2 = -Z \cdot R - N_1$

Основные осесимметричные нагрузки на купол



Усилия от собственного веса

Суммарная нагрузка от отсеченной части

$$Q_{\varphi} = 2\pi R \cdot a \cdot g \quad (3)$$

$a = R \cdot (1 - \cos \varphi)$ - подъем сферического сегмента

$r = R \cdot \sin \varphi$ - радиус кольцевого сечения

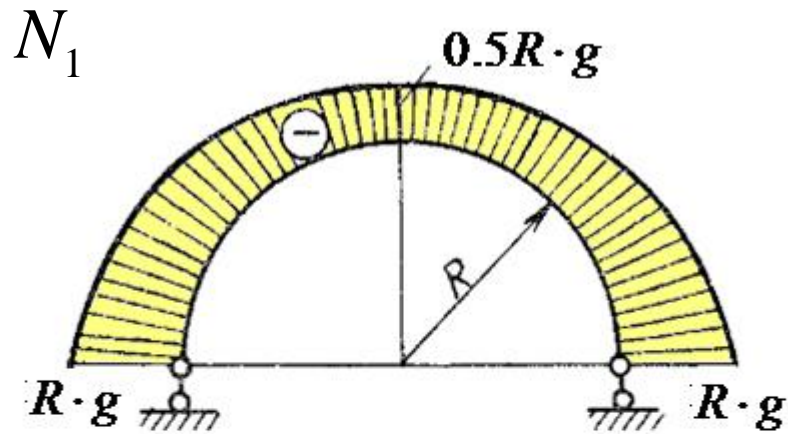
Учитывая эти зависимости, подставим в формулу (1) выражение (3):

$$\begin{aligned} N_1 &= - \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot R(1 - \cos \varphi) \cdot g}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi} = - \frac{R(1 - \cos \varphi) \cdot g}{(\sin \varphi)^2} = \\ &= - \frac{R(1 - \cos \varphi) \cdot g}{1 - (\cos \varphi)^2} = - \frac{R(1 - \cos \varphi) \cdot g}{(1 - \cos \varphi)(1 + \cos \varphi)} = - \frac{R \cdot g}{1 + \cos \varphi} \end{aligned}$$

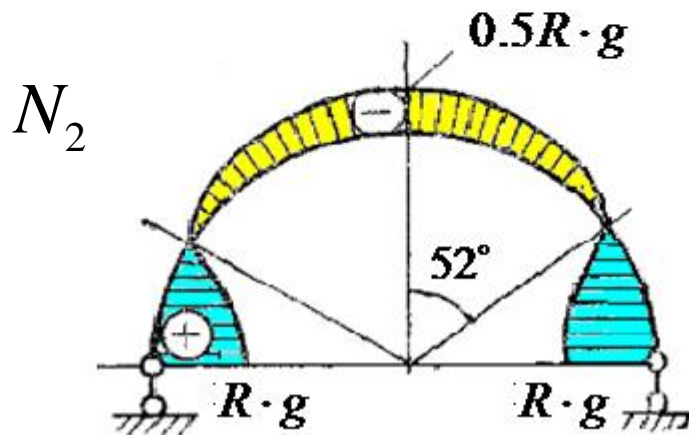
нормальная составляющая нагрузки $Z = g \cdot \cos\varphi$

Используя это выражение из формулы (2), получим:

$$N_2 = -Z \cdot R - N_1 = -g \cdot R \cdot \cos\varphi + \frac{R \cdot g}{1 + \cos\varphi} \quad (4)$$



Меридиональные усилия в оболочке купола N_1
(всегда сжатие)



Кольцевые усилия в оболочке купола N_2
(напряжения меняют знак)

Угол, соответствующий шву перехода находим из формулы (4)

$$-g \cdot R \cdot \cos \varphi + \frac{g \cdot R}{1 + \cos \varphi} = 0$$

Усилия от веса снега

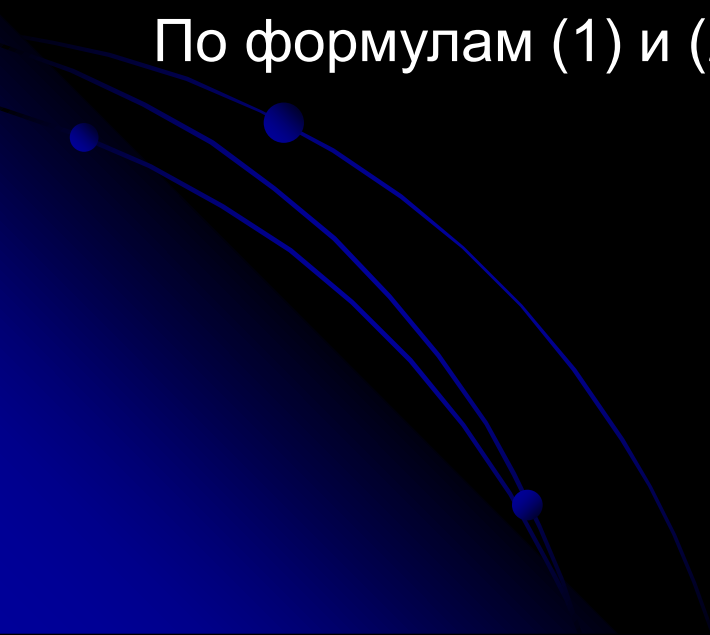
$$Q_{\varphi} = s \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sin^2 \varphi$$

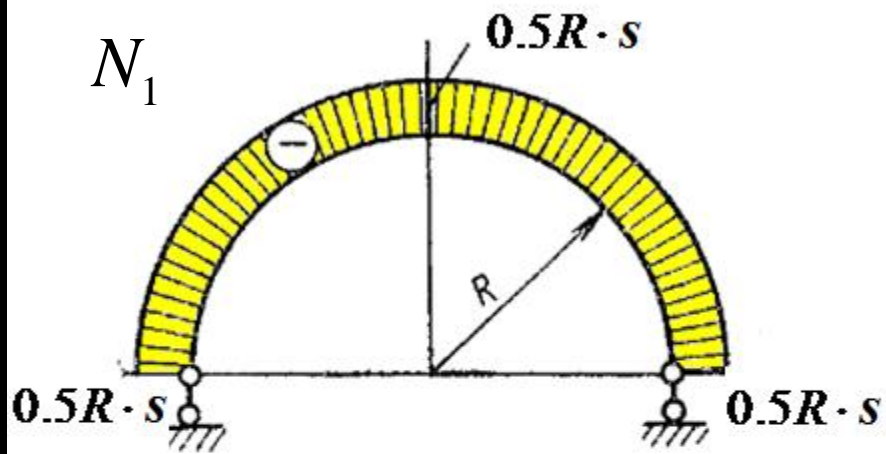
нормальная составляющая нагрузки: $Z = s \cdot \cos^2 \varphi$

По формулам (1) и (2) находим:

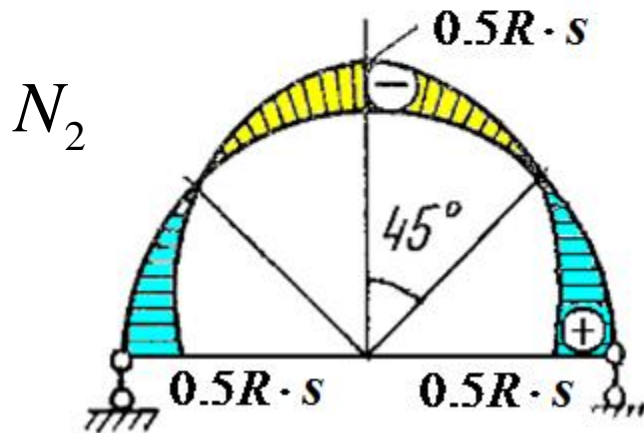
$$N_1 = -\frac{s \cdot R}{2}$$

$$N_2 = -\frac{s \cdot R}{2} \cos 2\varphi \quad (5)$$





Меридиональные усилия в оболочке купола N_1
(всегда сжатие)



Кольцевые усилия в оболочке купола N_2
(напряжения меняют знак)

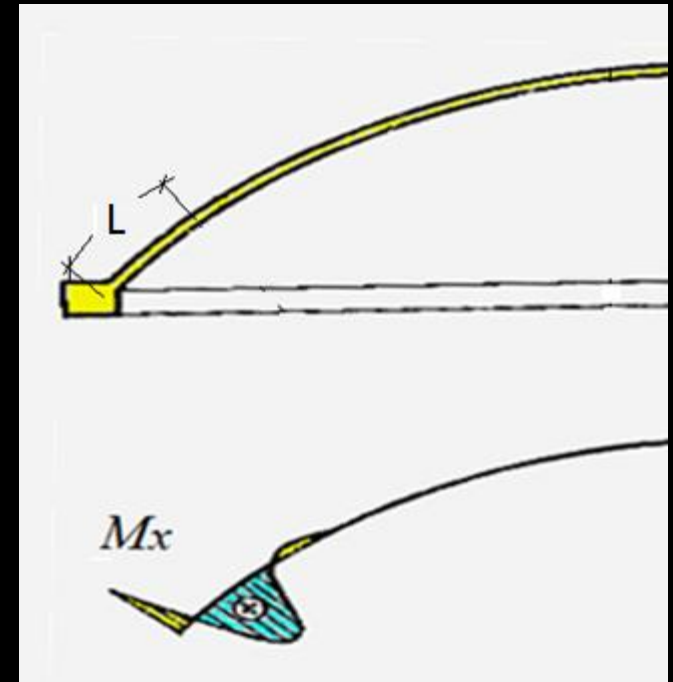
Угол, соответствующий шву перехода
находим из формулы (5)

$$-\frac{S \cdot R}{2} \cos 2\varphi = 0$$

УЧЕТ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА

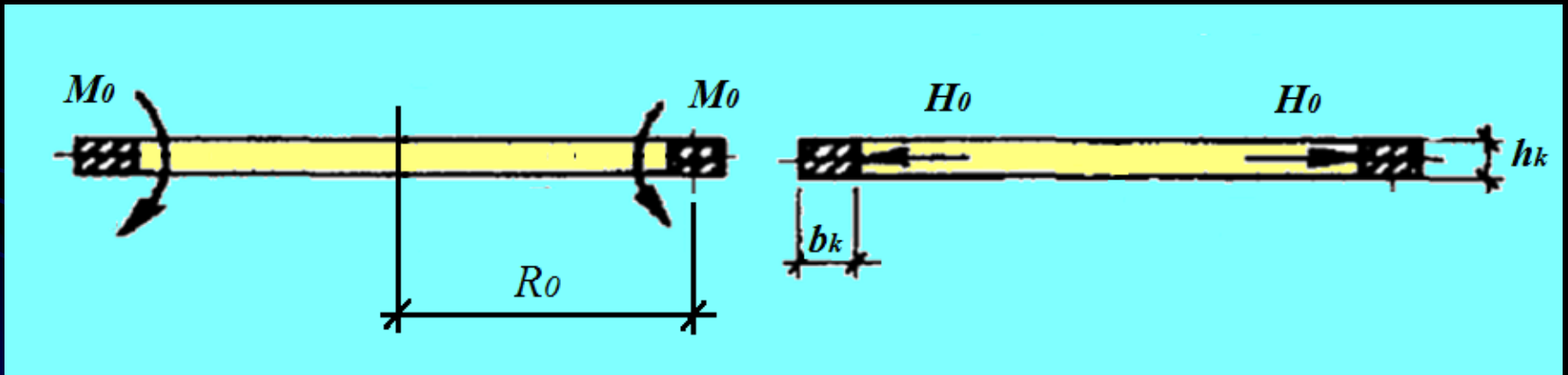
Опорное кольцо сдерживает свободные перемещения оболочки на контуре. Вследствие этого срединная поверхность оболочки искривляется от изгиба в меридиональном направлении.

Изгиб оболочки имеет локальный характер и быстро затухает по мере удаления от опорного кольца, сменяясь безмоментным НДС.



По линии контакта оболочки и кольца вследствие их взаимодействия возникают:

- изгибающий момент M_0 , действующий в меридиональном направлении
- радиальный распор H_0 , действующий в плоскости основания оболочки.



Их величины обуславливаются совместным деформированием оболочки и опорного кольца.

Система канонических уравнений метода сил, выражающих **совместность угловых и линейных перемещений** купола и опорного кольца по линии их контакта, имеет вид:

$$a_{11}M_0 + a_{12}H_0 = a_{10}$$

$$a_{21}M_0 + a_{22}H_0 = a_{20}$$

Коэффициенты a_{11} , a_{12} , a_{22} - это перемещения краев оболочки от неизвестных единичных усилий $M_0 = 1$ и $H_0 = 1$.

$$a_{11} = \frac{A}{D} + \frac{12 \cdot R_0^2}{E_b \cdot b_k \cdot h_k^3}$$

$$a_{12} = \frac{A^2}{2 \cdot D} \sin \varphi_0 - \frac{12 \cdot R_0^2}{E_b \cdot b_k \cdot h_k^3} e$$

$$a_{22} = \frac{A^3}{2 \cdot D} \sin^2 \varphi_0 + \frac{R_0^2}{E_b \cdot F_k} + \frac{12 \cdot R_0^2}{E_b \cdot b_k \cdot h_k^3} e^2$$

b_k, h_k - ширина и высота опорного кольца

φ_0 - половина центрального угла дуги оболочки в меридиональном направлении.

A - упругая характеристика:

для гладких куполов $A = 0,76\sqrt{\delta \cdot R_0}$

для ребристых куполов $A = (4 \cdot I_n \cdot R_0^2) / \delta_n$

I_n - момент инерции, приходящийся на единицу длины с учетом ребер;

δ_n - приведенная толщина оболочки с учетом сечения ребер.

• D - • изгибная жесткость меридиональной полосы единичной ширины

F_k - площадь сечения кольца

E_b - Модуль деформации бетона

Коэффициенты a_{10} и a_{20} - перемещения
краев сферической оболочки.

От собственного веса g

$$a_{10} = \frac{g \cdot A^4}{2 \cdot R_0} \sin \varphi_0 \quad a_{20} = \frac{g \cdot A^4}{4 \cdot R_0} \left(\cos \varphi_0 - \frac{1}{1 + \cos \varphi_0} \right) \sin \varphi_0$$

От веса снега s

$$a_{10} = \frac{3}{8} \cdot \frac{s \cdot A^4}{R} \sin 2\varphi_0 \quad a_{20} = \frac{s \cdot A^4}{8} \sin \varphi_0 \cdot \cos 2\varphi_0$$

Моменты $M(\lambda)$ и кольцевые усилия $N_2(\lambda)$ по длине меридиана в зависимости от краевых усилий M_0 и H_0 определяют по формулам:

$$M(\lambda) = -M_0(\cos \lambda + \sin \lambda)e^{-\lambda} + A \cdot H_0 \sin \varphi_0 \sin \lambda \cdot e^{-\lambda}$$

$$N_2(\lambda) = N_2 - \frac{2 \cdot R_0^2}{A^2} M_0 \cdot e^{-\lambda} \cdot (\sin \lambda - \cos \lambda) - \\ - \frac{2 \cdot R_0}{A} H_0 \cdot \sin \varphi_0 \cdot e^{-\lambda} \cdot \cos \lambda$$

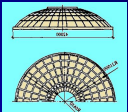
где $\lambda = L / A$ (отсчет длины дуги L ведут от края, к которому приложены усилия M_0 и H_0)

КОНСТРУИРОВАНИЕ

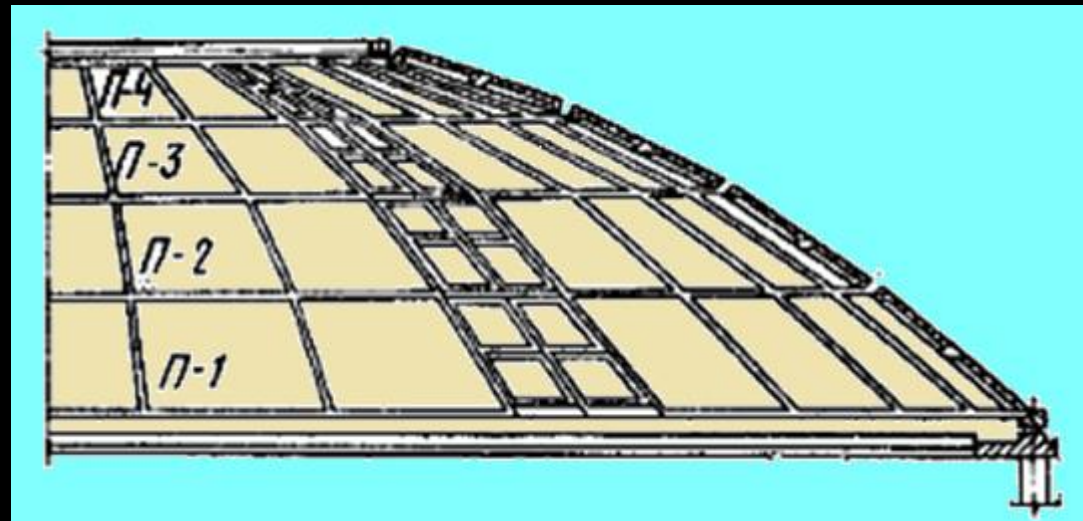
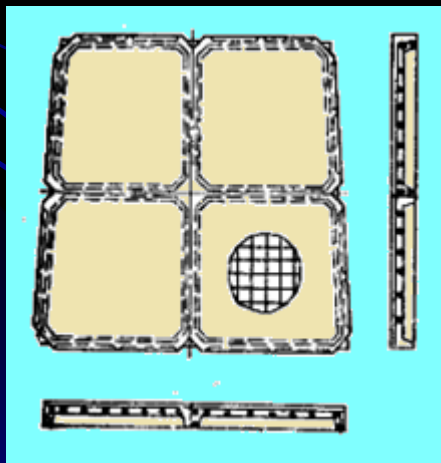
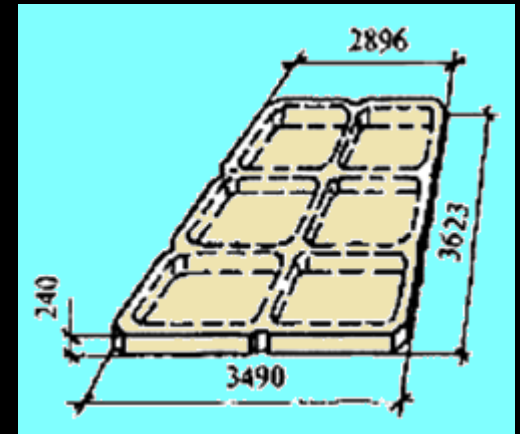
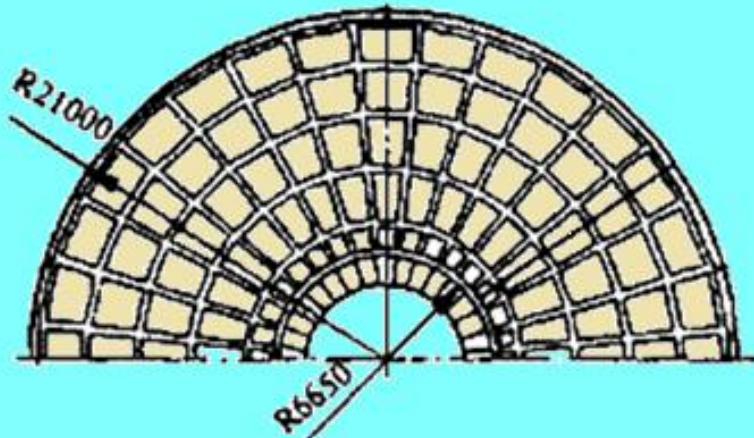
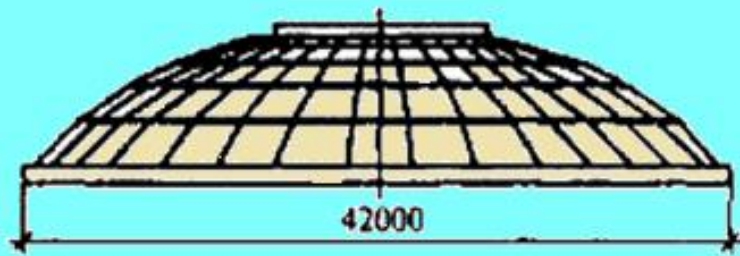
- Толщина от $1/800$ до $1/600$ радиуса кривизны оболочки, но не менее 5 см.
- При толщине до 70 мм рекомендуется конструктивное армирование в виде одиночной сетки из стержней диаметром 4-6 мм, с шагом 150-200 мм. При большей толщине рекомендуется устанавливать две сетки.
- В зоне примыкания оболочки к кольцу толщину оболочки увеличивают и устанавливают дополнительную сетку со стержнями диаметром 6-8 мм меридионального направления. Количество стержней рассчитывается по максимальному меридиональному изгибающему моменту.

Для обеспечения устойчивости оболочки купола должно соблюдаться условие:

$$q \leq \frac{E_b}{20} \left(\frac{h}{R} \right)^2$$



Сборный купол из ребристых плит

















СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ