

Вертикальные резервуары

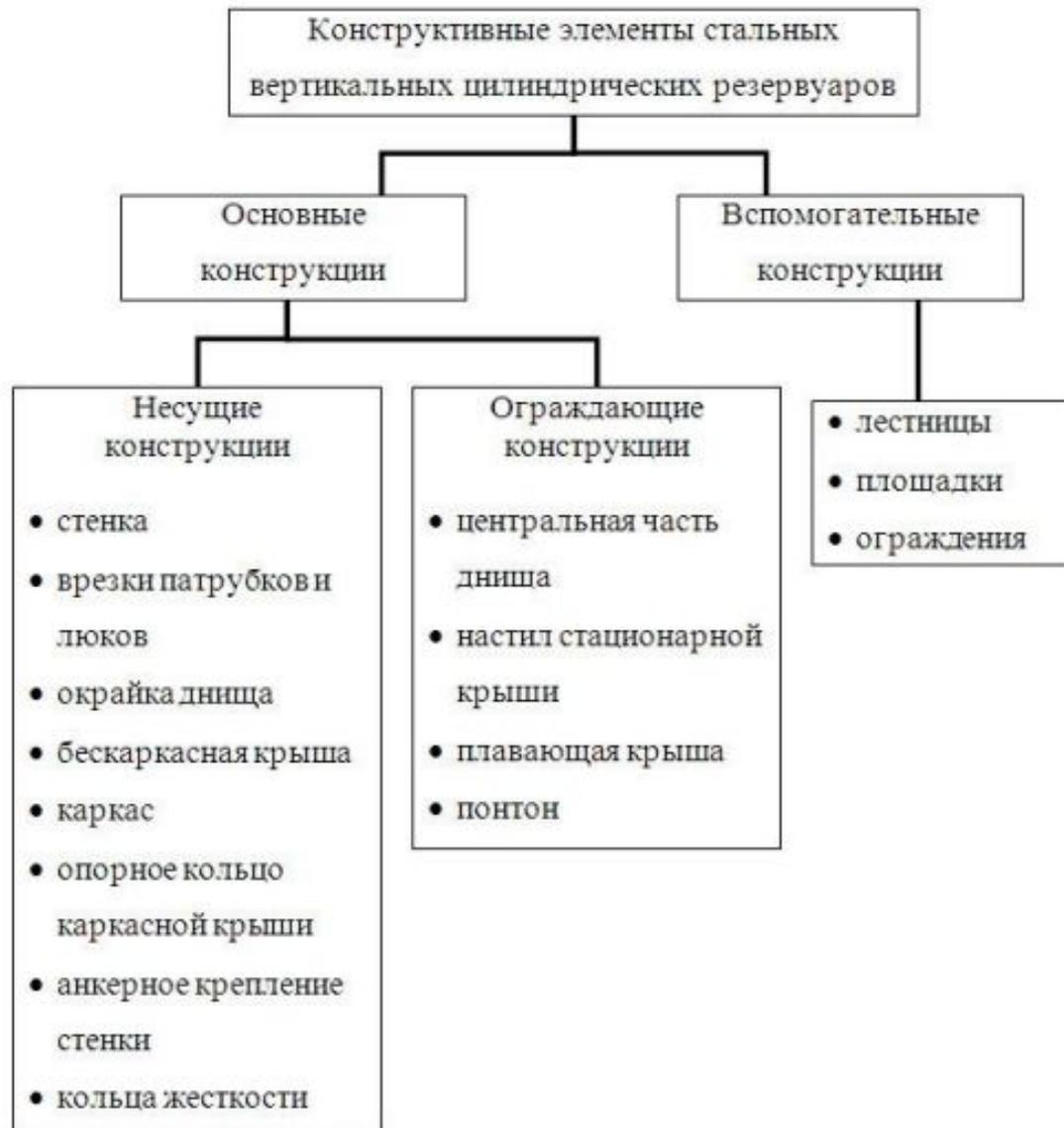


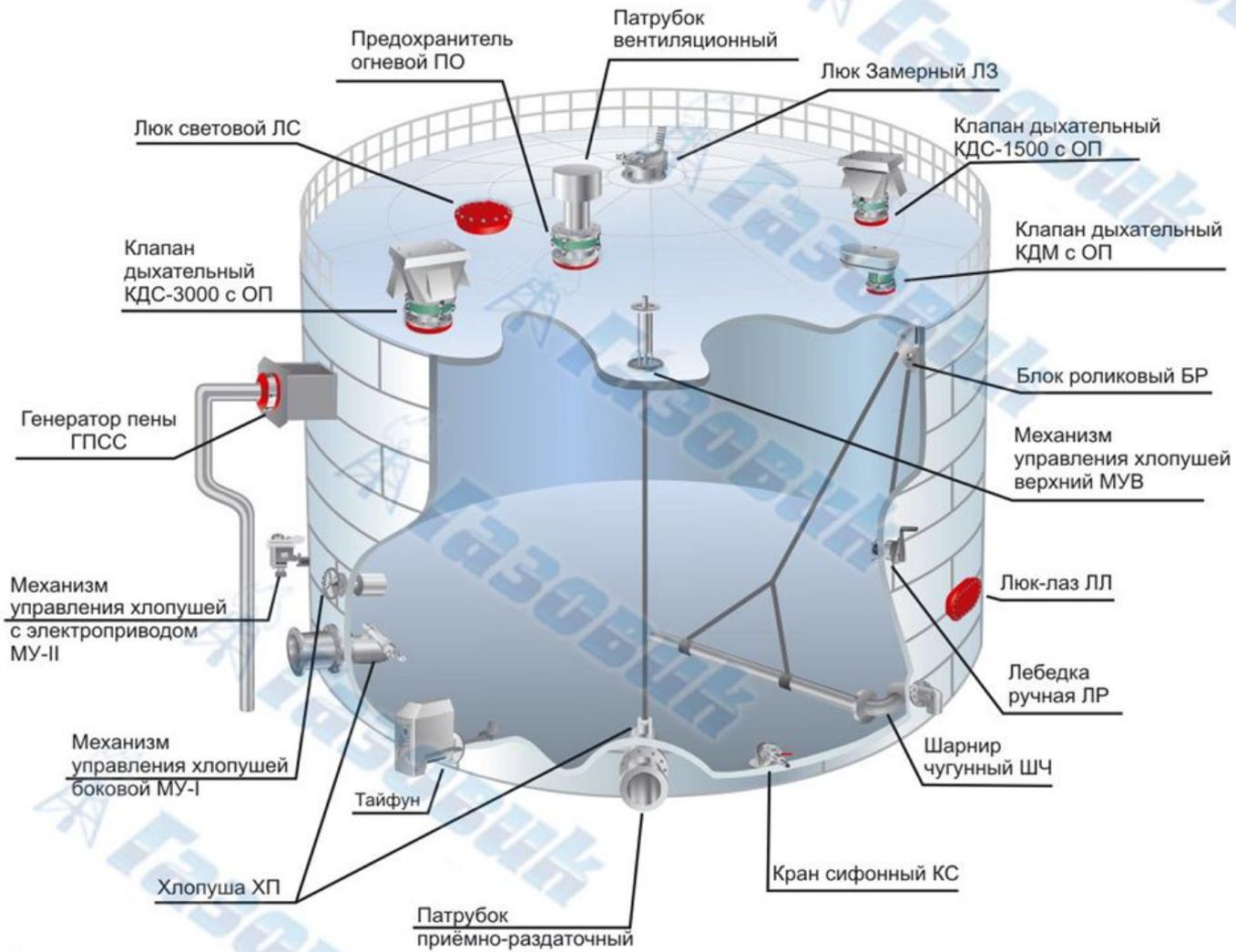
Меркулова Д.А.
Евдокимов А.А.
Ситникова А.О.



Вертикальные резервуары - это сосуды предназначенные для хранения жидкостей бытового и промышленного назначения.



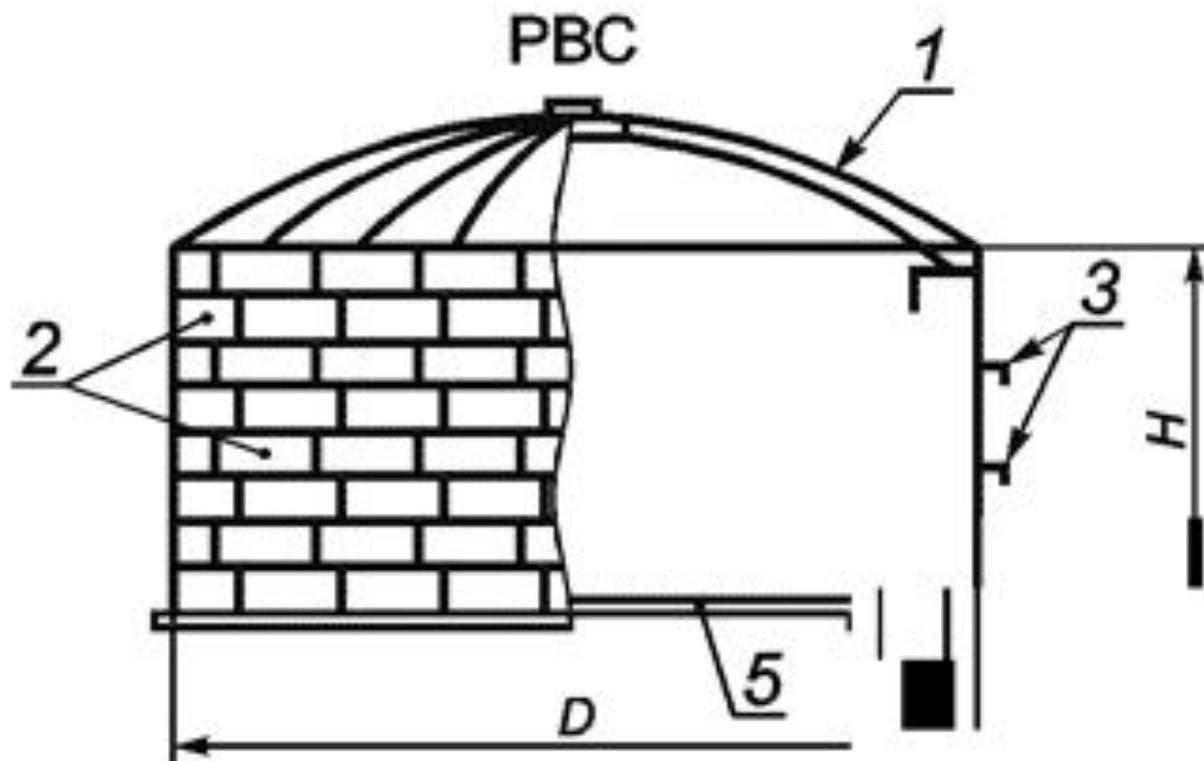




Типы вертикальных цилиндрических резервуаров:

- **РВС** – резервуар вертикальный стальной со стационарной крышей без понтона.

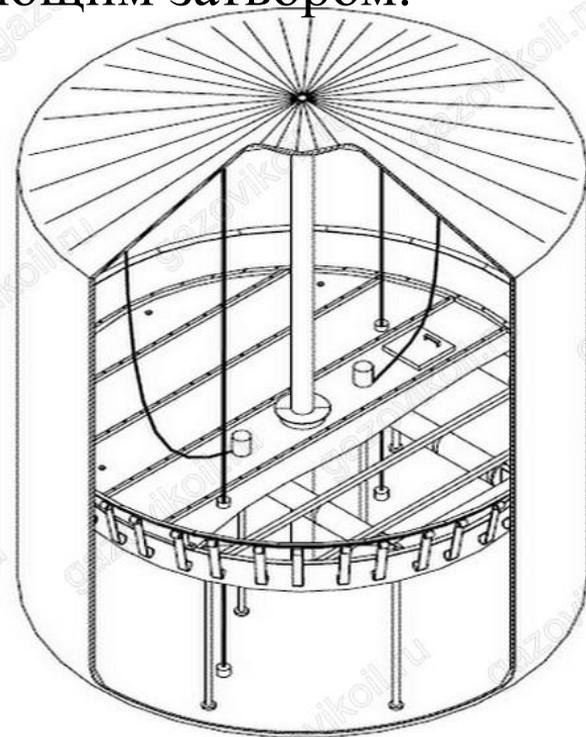
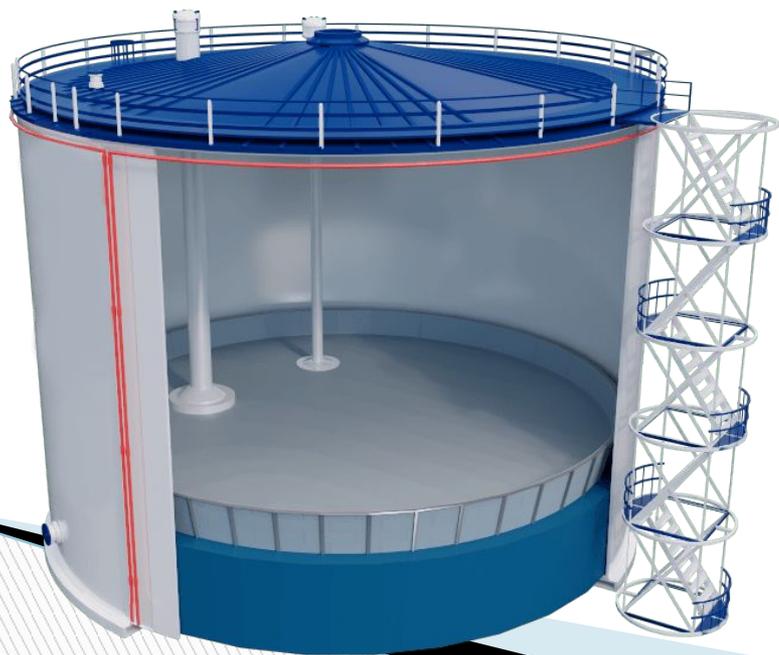
Используются для хранения продуктов с относительно низкой летучестью (с давлением насыщенных паров не более 26,6 кПа) и температурой воспламенения более 61⁰С. Наиболее часто в таких цилиндрических резервуарах складировуют мазут, дизельное топливо, бытовой керосин, битум, гудрон, масла (в том числе пищевые) и воду.



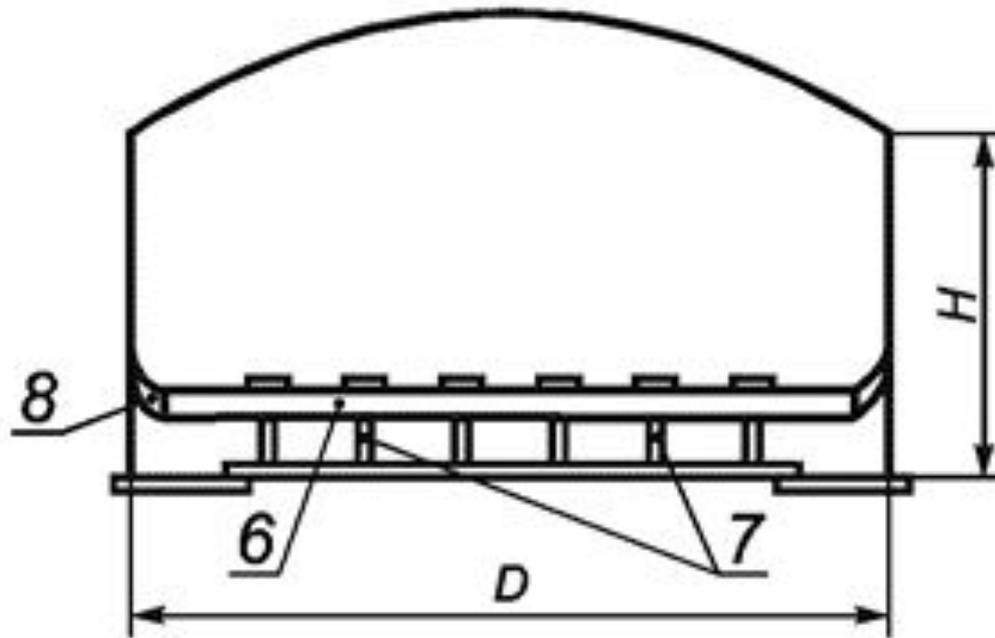
1 – каркас крыши; 2 – уплотняющие стенки; 3 – промежуточные кольца жесткости; 5 – центральная часть днища

РВСП – резервуар вертикальный стальной со стационарной крышей и понтоном.

- Наиболее часто в них складировались нефти, бензины, керосины, реактивное топливо. Понтон представляет собой жесткое газонепроницаемое плавающее покрытие в форме диска, помещаемое на зеркало продукта внутри цилиндрического резервуара так, чтобы было закрыто не менее 90% его площади. Кольцевой зазор между понтоном и стенкой резервуара герметизируется специальным уплотняющим затвором.



РВСП

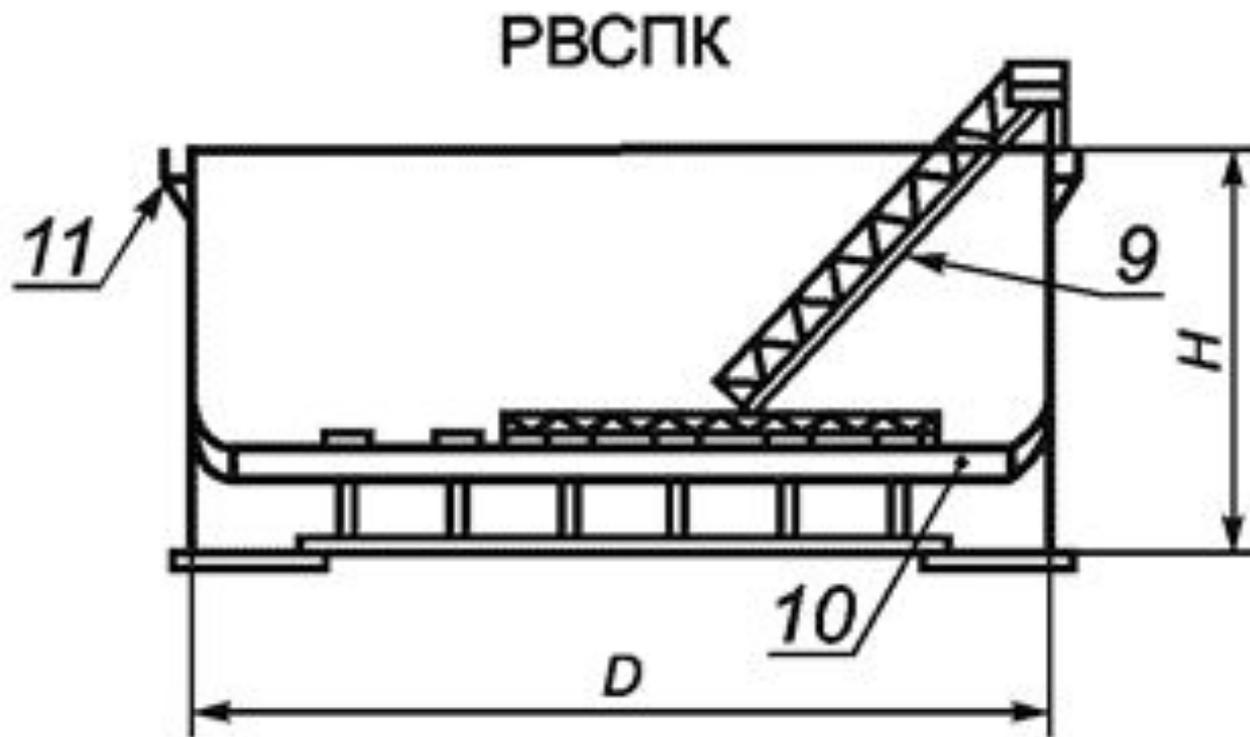


6 – понтон; 7 – опорные стойки; 8 – уплотняющий зазор

РВСПК – резервуар вертикальный стальной с плавающей крышей.

- Данная конструкция резервуара предполагает использование кровли, располагаемой на поверхности хранимого продукта с полным контактом.
- Недостаток плавающей крыши – возможность загрязнения хранимого продукта вследствие осадков. Также бывают случаи примерзания уплотняющего затвора крыши к стенке.
- Преимущества такой конструкции кровли в снижении потерь продукта от испарения.





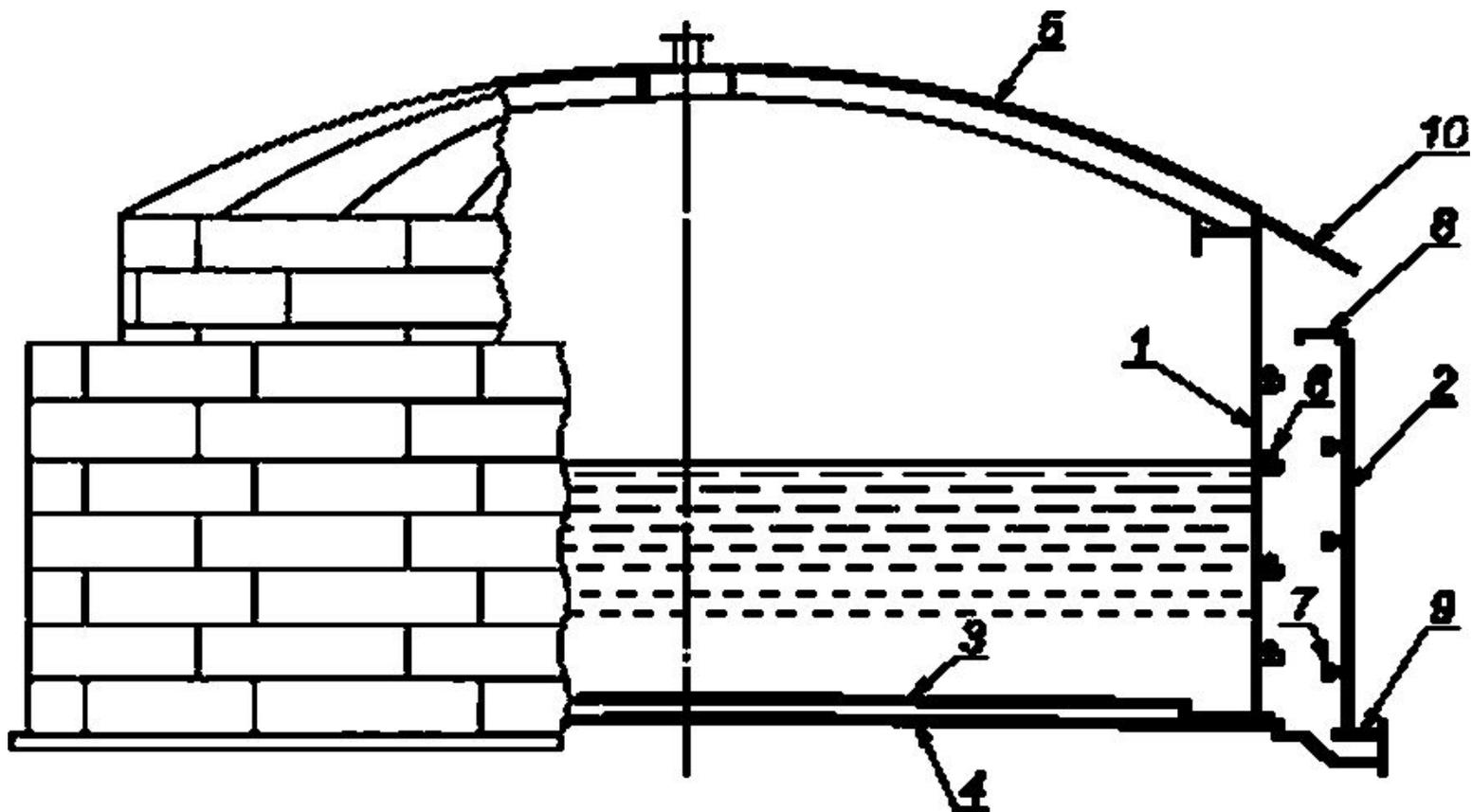
9 – катучая лестница; 10 – плавающая крыша; 11 – верхнее кольцо жесткости (площадка обслуживания)

Резервуары с защитной стенкой («стакан в стакане»)

Данная конструкция резервуара вертикального используется на производственных площадках, где нет возможности устройства обваловки резервуарного парка. Также цилиндрические резервуары с защитной стенкой строятся вблизи водоемов и жилых поселений для обеспечения безопасности окружающей среды и населения.

Защитная стенка монтируется с целью исключить разлив продукта при разгерметизации рабочего резервуара.

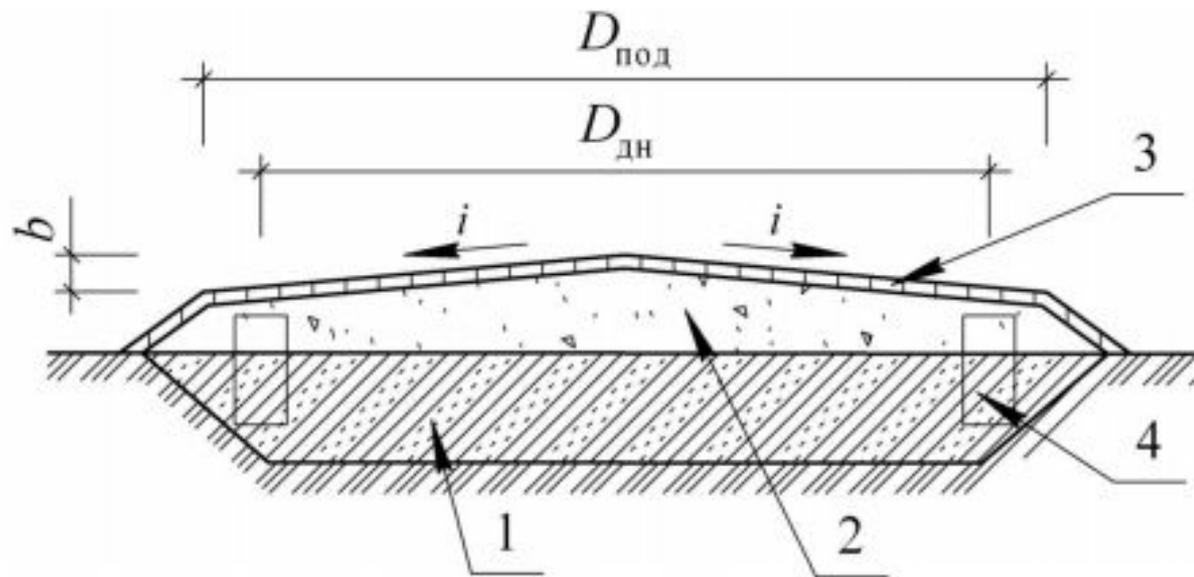




1 - основная стеки; 2 - защитная стенка. 3 - основное днище; 4 - защитное днище; 5 - стационарная крыша; 6 - аварийные канаты; 7 - кольца жесткости; 8 - ветровое кольцо; 9 - лотковый зумпф; 10 - атмосферозащитный козырек

Конструкции основания и фундамента под резервуары

- В качестве фундамента резервуара может быть использована грунтовая подушка (с железобетонным кольцом под стенкой и без него) либо железобетонная плита.



1 – насыпной уплотнённый грунт (или щебень); 2 – песчаная подушка с уклоном от центра; 3 – гидроизолирующий слой; 4 – железобетонное кольцо

Рис. 3.3 – Схема устройства основания под резервуар

Этапы разработки проектно-конструкторской документации на стальной вертикальный цилиндрический резервуар:

- 1) определение и назначение материалов, используемых для элементов стенки, днища и крыши резервуара;
 - 2) определение и назначение сварочных материалов, используемых для изготовления и монтажа строительных конструкций резервуара;
 - 3) определение геометрических размеров резервуара или их назначение из типового ряда;
 - 4) расчет и конструирование днища резервуара;
 - 5) расчет и конструирование стенки резервуара;
 - 6) расчет и конструирование крыши резервуара;
 - 7) разработка конструктивных решений люков-лазов и патрубков на стенке и крыше;
 - 8) разработка технологического оборудования на резервуар;
 - 9) разработка конструктивных решений лестниц, ограждений и переходных площадок;
 - 10) разработка конструктивных решений элементов.
- 

Сбор нагрузок

К **постоянным** нагрузкам относятся нагрузки от **собственного веса элементов конструкций резервуаров.**

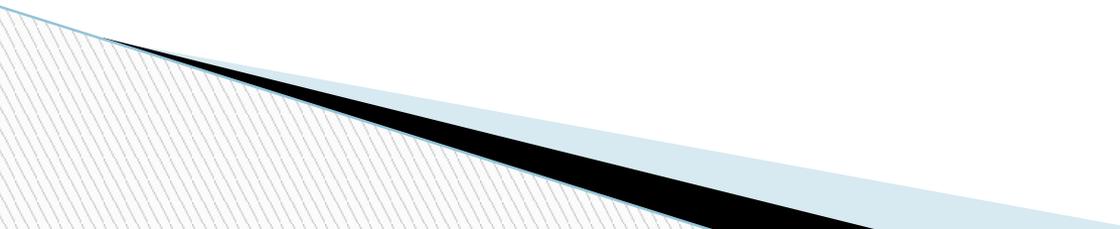
К **временным длительным** нагрузкам относятся:

- нагрузка от веса стационарного оборудования;
- гидростатическое давление хранимого продукта;
- избыточное внутреннее давление или относительное разрежение в газовом пространстве;
- снеговые нагрузки с пониженным нормативным значением;
- нагрузка от веса теплоизоляции;
- температурные воздействия;
- воздействия от деформаций основания, не сопровождающиеся коренным изменением структуры грунта.

К временным кратковременным нагрузкам относятся:

- ветровые нагрузки;
- снеговые нагрузки с полным нормативным значением;
- нагрузки от веса людей, инструментов, ремонтных материалов;
- нагрузки, возникающие при изготовлении, хранении, транспортировке и монтаже конструкций резервуара.

К особым нагрузкам относятся:

- сейсмические воздействия;
 - аварийные нагрузки, связанные с нарушением технологического процесса;
 - воздействия от деформаций основания, сопровождающиеся коренным изменением структуры грунта;
 - нагрузки, возникающие в процессе стихийного бедствия.
- 



Учет уровня ответственности

Уровень ответственности (класс опасности) резервуаров при расчете прочности и устойчивости основных несущих конструкций должен учитываться снижением расчетного сопротивления стали на коэффициент надежности по ответственности γ_n

Класс ответственности	
I	1,20
II	1,10
III	1,05
IV	1,00

- класс I - резервуары объемом более 50 000 м³;
- ▶ класс II - резервуары объемом от 20 000 до 50 000 м³, а также резервуары объемом от 10 000 до 50 000 м³, расположенные непосредственно по берегам рек, крупных водоемов и в черте городской застройки;
- ▶ класс III - резервуары объемом от 1000 до 20 000 м³;
- ▶ класс IV - резервуары объемом менее 1000 м³.

Учет условий работы

Элементы конструкций резервуаров	Коэффициент условий работы γ_c
Стенка резервуаров при расчете на прочность	по таблице 9.3
Сопряжение стенки с крышей	1,0
То же, при расчете на устойчивость	1,0
Стационарные и плавающие крыши	0,9
Верхние кольца жесткости крыш резервуаров при расчете на прочность и устойчивость	0,9
Врезки в стенку резервуара	1,0
Остальные элементы конструкций	

№ пояса	Коэффициент условий работы поясов стенки, γ_c	
	в условиях эксплуатации	в условиях гидравлических испытаний
1-ый	0,7	0,9
Все, кроме 1-го	0,8	0,9
Упорный узел	1,2	

Учет температуры эксплуатации

Для условий эксплуатации резервуаров при температуре выше плюс 100°С необходимо учитывать снижение расчетного сопротивления стали путем введения коэффициента γ_t , назначаемого в зависимости от максимальной расчетной температуры металла T по формулам:

$$\gamma_t = \frac{[\sigma]_T}{[\sigma]_{20}}, \text{ если } T > 100^\circ\text{C}$$
$$\gamma_t = 1, \text{ если } T \leq 100^\circ\text{C}$$

$[\sigma]_T$, $[\sigma]_{20}$ - допускаемые напряжения стали при температуре соответственно T и 20°С, определяемые по ГОСТ Р 52857.1-2007. В случае применения сталей, не указанных в ГОСТ Р 52857.1-2007, допускаемые напряжения принимаются по согласованию с Заказчиком.

Расчетные сочетания нагрузок

ВИД НАГРУЗКИ	СОЧЕТАНИЯ НАГРУЗОК ДЛЯ РАСЧЕТА СТЕНКИ			
	Условия эксплуатации	Гидравлические испытания	Устойчивость пустого резервуара	Условия землетрясения
Вес продукта (или воды при гидравлических испытаниях)	+	+	-	+
Вес конструкций и теплоизоляции	-	-	+	+
Избыточное давление	+	+	-	+
Вакуум при опорожнении	-	-	+	-
Ветровая нагрузка	-	-	+	-
Вес снегового покрова	-	-	+	+
Сейсмическая нагрузка	-	-	-	+

ВИД НАГРУЗКИ	СОЧЕТАНИЯ НАГРУЗОК ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЛЬНОЙ ЗАЩИТНОЙ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА		
	Сочетание 1 (Гидроиспытания)	Сочетание 2 (Эксплуатация)	Сочетание 3 (Авария)
Вес конструкций и оборудования	-	+	+
Ветровая нагрузка	-	+	-
Осесимметричная гидростатическая нагрузка от веса воды	+	-	-
Неосесимметричная гидродинамическая нагрузка от разливающегося продукта (рис. 7.9)	-	-	+

РАСЧЕТ СТЕНКИ

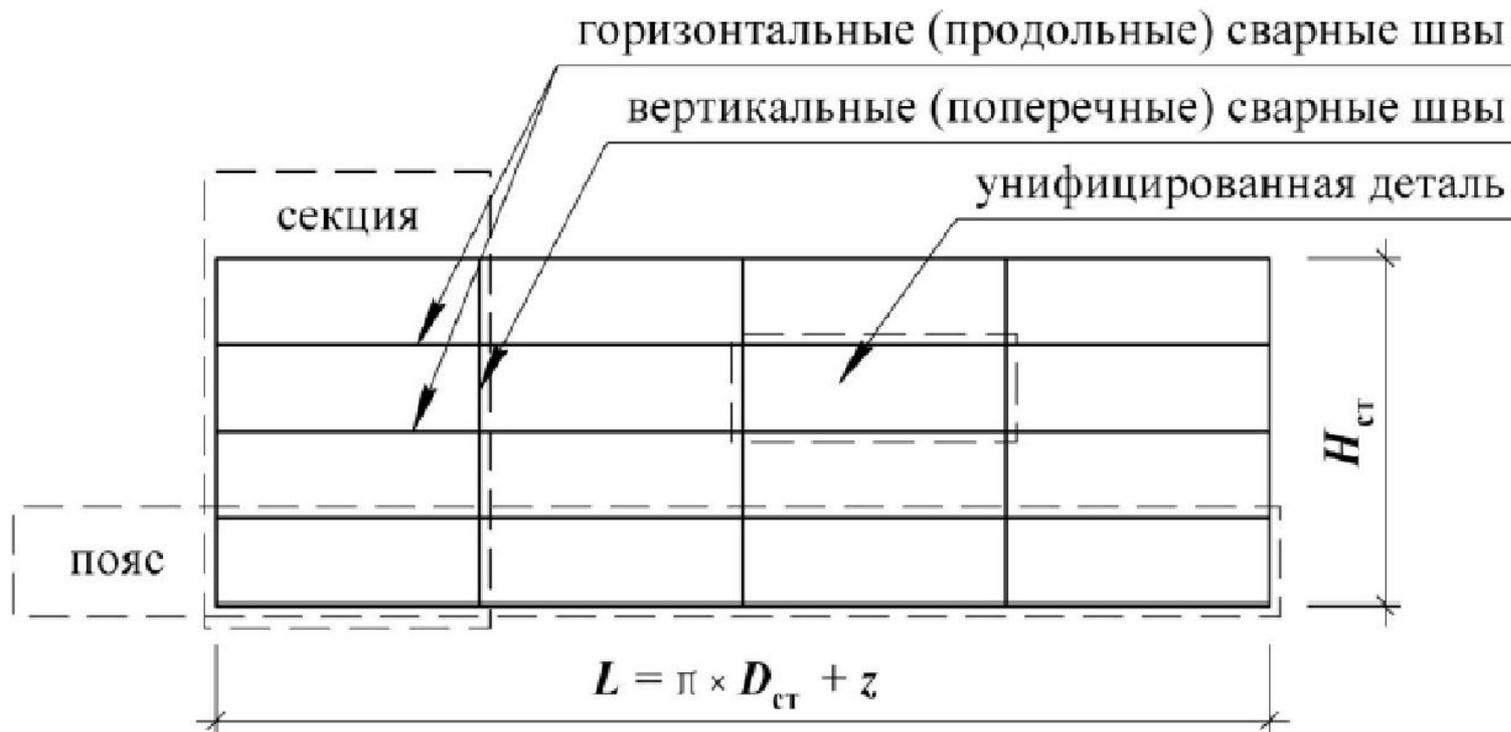


Рис. 3.5 – Схема развёртки стенки резервуара

Номинальные толщины поясов стенки резервуара назначаются по итогам выполнения следующих расчетов:

а) определение толщины поясов из условия прочности стенки при действии статических нагрузок в условиях эксплуатации и гидравлических испытаний;

б) проверка устойчивости стенки;

в) проверка прочности и устойчивости стенки при сейсмическом воздействии (в сейсмически опасных районах).

Основной нагрузкой при расчете стенки на прочность является **гидростатическое давление**, которое, совместно с избыточным давлением, вызывает появление в стенке кольцевых растягивающих напряжений.

а) нагрузка от гидростатического давления жидкости в расчетном уровне каждого пояса $P_{ж}$ (кН/м²):

$$P_{ж} = \gamma_{fж} g \rho (H - z)$$

$\gamma_{fж}$ – коэффициент надежности по нагрузке, принимаемый для гидростатического давления равным 1;

g – ускорение свободного падения в районе строительства;

ρ – плотность продукта;

H – высота налива продукта

z – расстояние от дна до нижней кромки расчетного пояса.

Обычно высота налива продукта определяется технологическим регламентом эксплуатации резервуара и составляет 90-95% высоты стенки.

б) нагрузка от избыточного давления $P_{и}$ (кН/м²):

$$P_{и} = \gamma_{fи} P_{ин}$$

$\gamma_{fи}$ – коэффициент надежности по нагрузке для избыточного давления, принимаемый равным 1,2;

$P_{ин}$ – нормативное значение избыточного давления, принимаемое для резервуаров низкого давления равным 2 кН/м².

При расчёте стенки резервуара с понтоном избыточное давление отсутствует. Однако при этом учитывается нагрузка от собственного веса понтона, которая может быть определена после назначения его конструкции и определения толщин элементов.

□ Кроме кольцевых напряжений в стенке возникают и меридиональные напряжения (осевые) от вертикальных нагрузок, к которым относят:

а) собственный вес покрытия, площадок ограждения и стационарного оборудования G_0 (кН):

$$G_0 = \gamma_{fg} G_{on} \pi r^2$$

γ_{fg} – коэффициент надежности по нагрузке для собственного веса металлоконструкций, принимаемый равным 1,05;

G_{on} – нормативное значение распределенной нагрузки от веса покрытия, площадок ограждения и стационарного оборудования, приближенно может быть определено по обобщенным показателям в зависимости от объема резервуара

r – радиус срединной поверхности пояса стенки;

Вес покрытия, площадок ограждения и оборудования

Объем резервуара V , м ³	1000	5000	10000	20000
Вес крыши и оборудования, $G_0 n$, кН/м ²	0,3	0,35	0,45	0,55

Нагрузка от собственного веса приведена приближенной, и зависит не только от объема резервуара, но и от типа стационарной крыши. По результатам конструктивного расчета крыши данная нагрузка может быть уточнена и принята в дальнейшем для определения более точных значений меридиональных напряжений.

б) вес металлоконструкций выше расчетной точки G_M (кН):

$$G_M = \gamma_{fg} 2\pi r \rho_M g H_{ст,i} t_i$$

ρ_M - плотность стали;

$H_{ст,i}$ высота стенки выше рассматриваемого уровня;

t_i - номинальная толщина i -го пояса стенки.

Вес стенки определяется для каждого пояса.

в) вес утеплителя G_y (кН) складывается из веса теплоизоляции на кровле и веса утеплителя стенки выше расчетного уровня:

$$G_y = \gamma_{fy} G_{yn} S_{\text{пов}} + G_{yn} \cdot 2\pi r \cdot H_{\text{ст},i}$$

γ_{fy} – коэффициент надежности по нагрузке для собственного веса утеплителя, принимаемый равным 1,2;

G_{yn} – нормативное значение веса утеплителя, принимаемое в зависимости от материала утеплителя и его толщины (кН/м²);

$S_{\text{пов}}$ – площадь поверхности круга

Для сферической $S_{\text{пов}} = 2\pi R_{\text{пов}} h_{\text{кр}}$

Для конической $S_{\text{пов}} = \pi \cdot r \cdot \sqrt{h_{\text{кр}}^2 + r^2}$;

$R_{\text{пов}}$ – радиус сферической поверхности крыши;

$h_{\text{кр}}$ – высота крыши, стрела подъема.

Как правило, утеплитель на стенке закрывается от внешних атмосферных воздействий оцинкованной сталью толщиной 0,8-1 мм. В этом случае собственный вес утеплителя на резервуаре с защитным кожухом из оцинкованной стали определится следующим образом:

$$G_Y = \gamma_{fY} \cdot G_{Yn} \cdot (S_{\text{пов}} + 2\pi \cdot r \cdot H_{\text{ст},i}) + \gamma_{fg_{\text{зк}}} \cdot \rho_{\text{зк}} \cdot g \cdot 2\pi \cdot r \cdot H_{\text{ст},i} \cdot t_{\text{зк}},$$

$\rho_{\text{зк}}$ - плотность материала защитного кожуха;

$t_{\text{зк}}$ - толщина стенки защитного кожуха;

$\gamma_{fg_{\text{зк}}}$ - коэффициент надежности для собственного веса защитного кожуха, принимаемый равным: для оцинкованной стали – 1,05, для защиты из полимерных материалов – 1,2.

□) вес снега S (кН/м²):

$$S = S_g \cdot \mu,$$

S_g - расчетное значение веса снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли;

μ - коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие

РАСЧЕТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

□ При расчете на устойчивость рассматривается пустой резервуар, в котором отсутствует гидростатическое давление продукта и избыточное давление, и рассматриваются следующие нагрузки:

а) нагрузка от относительного разрежения (вакуум)
 $P_{\text{вак}}$ (кН/м²):

$$P_{\text{вак}} = \gamma_{f \text{ вак}} \cdot P_{\text{вак н}},$$

$\gamma_{f \text{ вак}}$ - коэффициент надежности по нагрузке для вакуума, принимаемый равным 1,2;

$P_{\text{вак н}}$ - нормативное значение вакуума, принимаемое для резервуаров низкого давления равным 0,25 кН/м².

□ б) ветровая нагрузка $P_{\text{вет}}$ (кН/м²):

$$P_{\text{вет}} = \gamma_{f_{\text{вет}}} \cdot w_0 \cdot k \cdot c,$$

$\gamma_{f_{\text{вет}}}$ — коэффициент надежности по нагрузке для ветровой нагрузки, принимаемый при расчете на устойчивость равным 0,5;

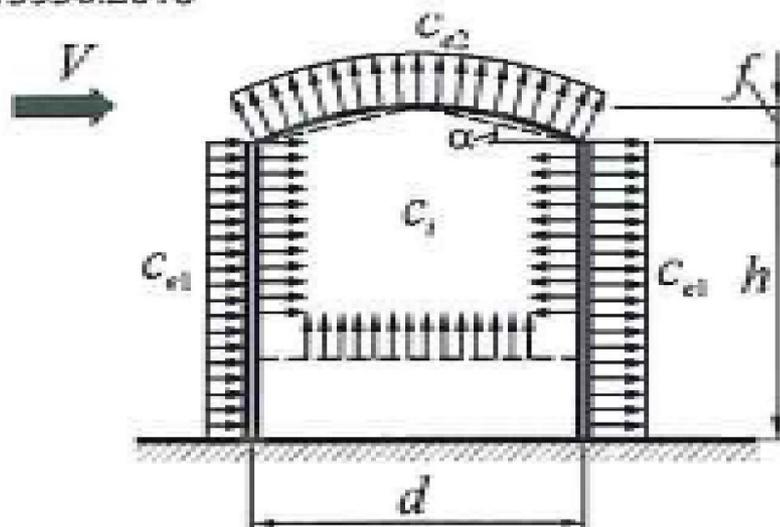
w_0 — нормативное значение ветрового давления;

k — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте;

c — аэродинамический коэффициент.

- Ветровая нагрузка для сооружений с круговой цилиндрической поверхностью учитывается согласно приложению В.1.12 СП 20.13330.2016.

СП 20.13330.2016



□ Предварительный выбор толщин поясов стенки

Предварительный выбор номинальных толщин поясов производится с помощью расчета на эксплуатационные нагрузки, на нагрузку гидроиспытаний и по конструктивным требованиям.

Минимальная расчетная толщина стенки в каждом поясе для условий эксплуатации t_e рассчитывается по формуле:

$$t_e = \frac{g \cdot \rho \cdot (H - z) \cdot r}{R_y \cdot \gamma_c},$$

γ_c – коэффициент условий работы, равный 0,7 для нижнего пояса, равный 0,8 для всех остальных поясов.

□ Минимальная расчетная толщина стенки в каждом поясе для условий гидравлических испытаний t_g рассчитывается по формуле:

$$t_g = \frac{g \cdot \rho_B \cdot (H_g - z) \cdot r}{R_y \cdot \gamma_c},$$

ρ_B – плотность используемой при гидроиспытаниях воды;

H_g – высота налива воды при гидроиспытаниях;

γ_c - коэффициент условий работы при гидроиспытаниях для всех поясов одинаков.

По конструктивным требованиям толщина t_k определяется по табл.

Минимальная конструктивно необходимая толщина t_k , мм

Диаметр резервуара D , м	Рулонное исполнение		Полистовое исполнение
	Стационарная крыша	Плавающая крыша	
$D < 16$	4	4	5
$16 < D < 16$	6	5	7
$25 < D < 35$	8	6	9
$D > 35$	10	8	10

- Номинальная толщина t каждого пояса стенки выбирается из сортаментного ряда следующим образом:

$$t - \Delta \geq \max(t_e + c, t_g, t_k),$$

Δ – минусовой допуск на прокат;

c – припуск на коррозию.

Величина припуска на коррозию задается заказчиком и зависит от агрессивности хранимого в резервуаре продукта и нормативного срока его эксплуатации.

Поверочный расчет на прочность и расчет на устойчивость проводится для расчетной толщины t_p поясов, которая определяется по формуле:

$$t_p = t - \Delta - c.$$

Проверка стенки на прочность

- Проверка прочности стенки выполняется по приведенным и по кольцевым напряжениям:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n},$$

$$\sigma_2 \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n},$$

γ_c – коэффициент условий работы при расчете на прочность, $\gamma_c = 0,7$ – для нижнего пояса, $= 0,8$ – для всех остальных поясов.

□ Кольцевые напряжения σ_2 вычисляются для нижних точек поясов по формуле:

$$\sigma_2 = \frac{(g \cdot \rho \cdot (H - z) + 1,2 \cdot P_{ин}) \cdot r}{t_p} = \frac{(P_{ж} + P_{н}) \cdot r}{t_p}.$$

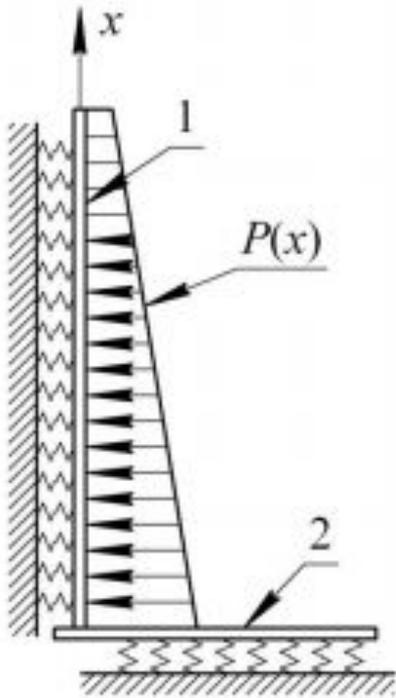
Меридиональные напряжения σ_1 с учетом коэффициентов надежности по нагрузке и коэффициентов для основного сочетания нагрузок вычисляются для нижних точек поясов по формуле

$$\sigma_1 = \frac{G_M + 0,95(G_O + G_Y)}{2\pi \cdot r \cdot t_p} + \frac{(0,9 \cdot S - 0,95 \cdot P_{н}) \cdot r}{2 \cdot t_p},$$

0,95 – коэффициент сочетания для временных длительных нагрузок в основном сочетании (вес стационарного оборудования, нагрузка от веса теплоизоляции, избыточное давление);

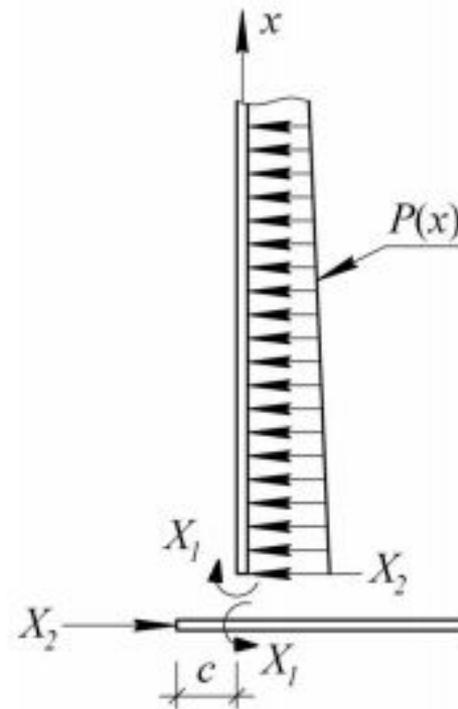
0,9 – коэффициент сочетания для временных кратковременных нагрузок в основном сочетании (снеговая нагрузка).

Расчёт узла сопряжения стенки с дном



1 – стенка резервуара; 2 – днище

Расчетная схема нижнего узла резервуара



Основная система. Усилия, действующие на нижний узел резервуара

Расчёт узла сопряжения стенки с днищем

- Проверка прочности узла сопряжения стенки с днищем сводится к проверке условий прочности стенки и днища в точках сопряжения от действия изгибающих моментов. Изгибные напряжения в стенке и днище определяются по формулам:

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{6X_1}{t^2},$$

$$\sigma_{\text{дн}} = \frac{6M_{\text{дн}}}{t_{\text{дн}}^2}.$$

Условия прочности:

$$\sigma_{\text{ст}} \leq R_{\text{нч}} \cdot \gamma_c,$$

$$\sigma_{\text{дн}} \leq R_y \cdot \gamma_c.$$

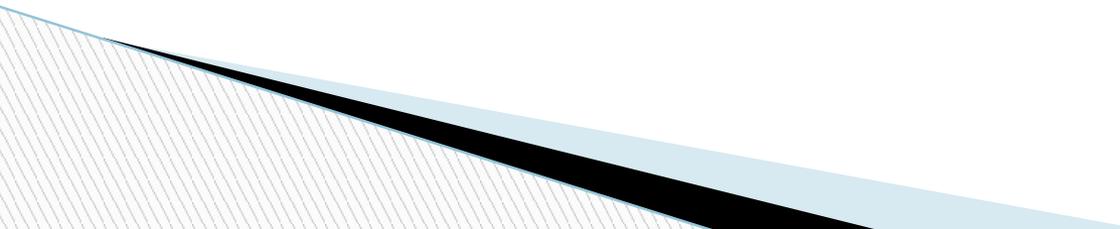
- Проверку прочности угловых швов, прикрепляющих стенку к днищу, можно выполнить на одновременное воздействие поперечной силы и момента. Прочность проверяют по металлу шва и по границе сплавления.

$$\sqrt{\left(\frac{X_1}{t}\right)^2 + \left(\frac{X_2}{2}\right)^2} \leq \beta_f \cdot k_f \cdot \gamma_{wf} \cdot R_{wf};$$

$$\sqrt{\left(\frac{X_1}{t}\right)^2 + \left(\frac{X_2}{2}\right)^2} \leq \beta_z \cdot k_f \cdot \gamma_{wz} \cdot R_{wz}.$$

где 2 – учитывает два угловых шва.

Сбор нагрузок на кровлю

- При расчёте покрытия резервуаров низкого давления учитываются 2 комбинации нагрузок: «сверху вниз» и «снизу вверх».
 - Нагрузки, действующие на крышу «сверху вниз»: вес конструкции крыши и теплоизоляции, снег, вакуум.
 - Нагрузки, действующие на крышу «снизу вверх»: внутреннее избыточное давление в паровоздушной среде, ветровой отсос, собственный вес крыши.
- 

- Нормативная нагрузка по первой комбинации определяется по формуле:

$$q_{n\downarrow} = g_{кр} + g_y + 0,9 \cdot (S \cdot 0,7 + P_{\text{вак}}),$$

- Расчётная нагрузка по первой комбинации определяется по формуле:

$$q_{\downarrow} = G_{On} \cdot \gamma_{fg} + G_{yn} \frac{S_{\text{пов}}}{\pi \cdot r^2} \cdot \gamma_{fy} + 0,9 \cdot (S + P_{\text{вак}} \cdot \gamma_{f\text{вак}})$$

где G_{On} – нормативное значение распределённой нагрузки от веса покрытия, площадок ограждения и стационарного оборудования (табл. 6.2);

G_{yn} – нормативное значение веса утеплителя, принимаемое в зависимости от материала утеплителя и его толщины;

$S_{пов}$ – площадь поверхности кровли (см. обозначения к формуле (6.5));

0,9 – коэффициент сочетания для временных кратковременных нагрузок в основном сочетании;

S – расчётное значение снеговой нагрузки по формуле (6.7);

0,7 – коэффициент перехода от расчётного значения снеговой нагрузки к нормативному значению (п. 5.7. [5]);

$P_{вак л}$ – нормативное значение вакуума, принимаемое для резервуаров низкого давления равным $0,25 \text{ кН/м}^2$ (рис. 6.4). Горизонтальной составляющей нагрузки пренебрегают ввиду малости.

где $\gamma_{fg} = 1,05$ – коэффициент надёжности по нагрузке от собственного веса металлоконструкций (табл. 1, [5]);

$\gamma_{fy} = 1,2$ – коэффициент надёжности по нагрузке от собственного веса теплоизоляции (табл. 1, [5]);

$\gamma_{f \text{ вак}} = 1,2$ – коэффициент надёжности по нагрузке для вакуума.

Примечание !

- ▶ Коэффициент c_e , который учитывает снос снега с покрытий зданий под действием ветра принимается для конических и сферических покрытий согласно п. 10.8 СП20.13330.2016
- ▶ Коэффициент μ для зданий со сферическими и коническими покрытиями учитывается согласно прил. Б.14 и Б.15 соответственно.

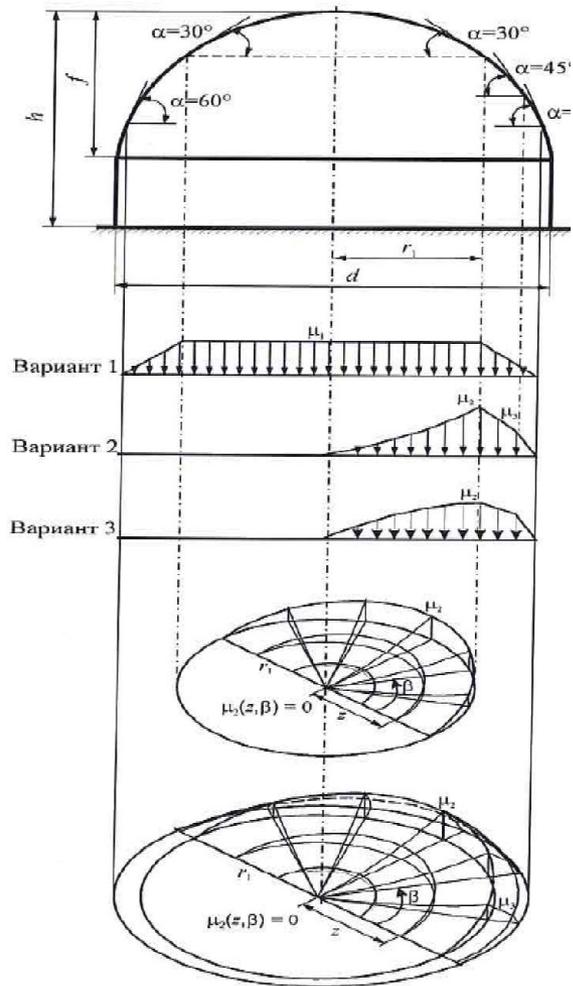


Рисунок Б.14

2016

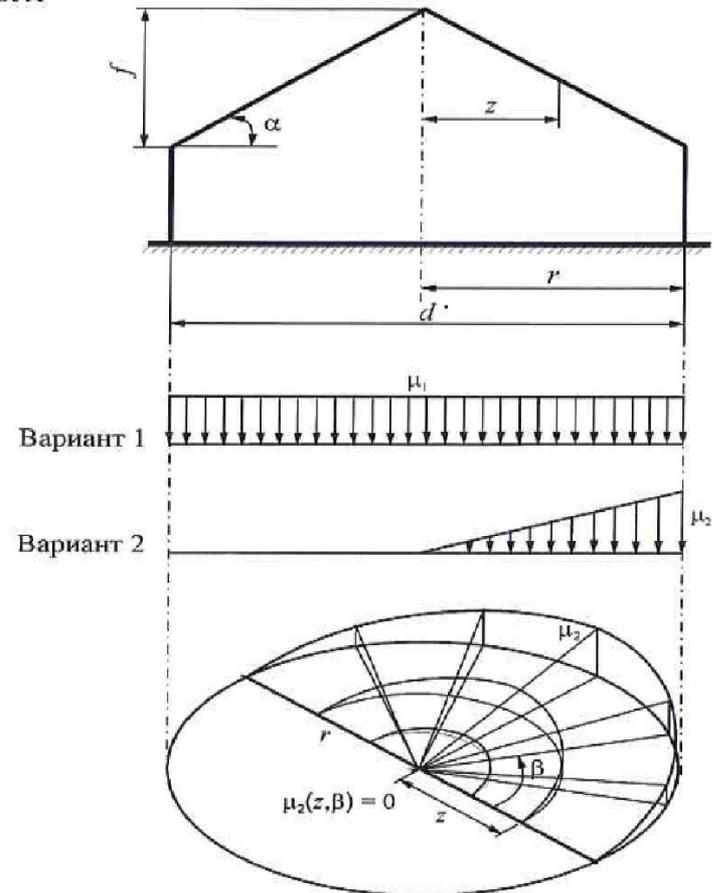
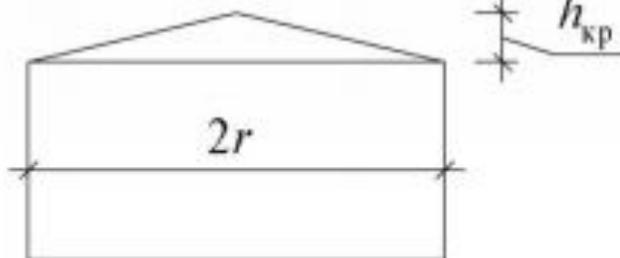
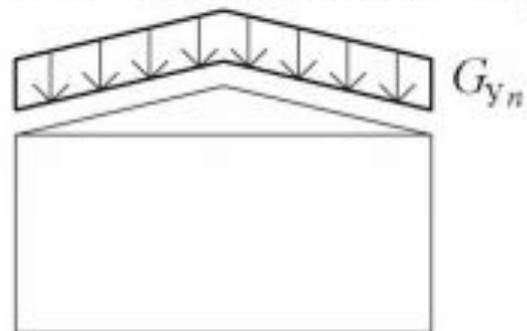
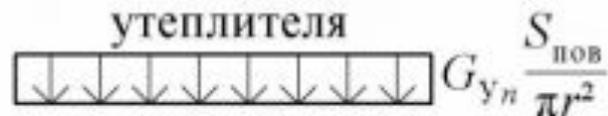


Рисунок Б.15

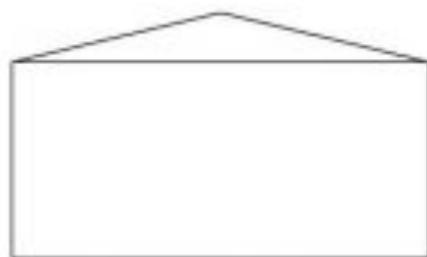
Собственный вес крыши



Собственный вес
утеплителя



Снеговая нагрузка



Вакуум

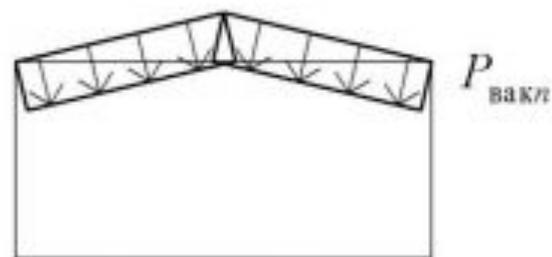


Рис.6.3 – Нормативные нагрузки, действующие на крышу «сверху вниз»

- Нормативная нагрузка по второй комбинации определяется по формуле:

$$q_{n\uparrow} = 0,9 \cdot (P_{ил} + P_{ветл}) - G_{Оп}$$

где $P_{ил}$ – нормативное значение избыточного давления, принимаемое для резервуаров низкого давления равным 2 кН/м^2 ;

$P_{ветл} = w_0 \cdot k \cdot c_{e2}$ – нормативное значение ветровой нагрузки;

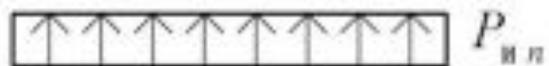
w_0 – нормативное значение ветрового давления (по табл. 5 [5]);

k – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте (по п. 6.5. [5]);

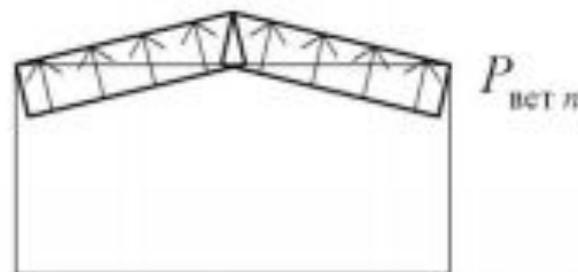
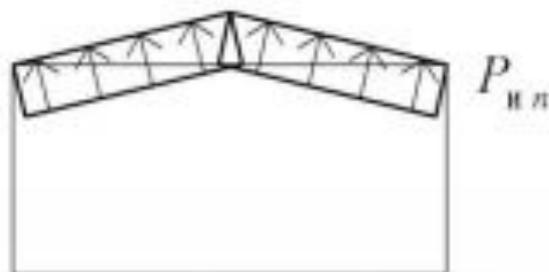
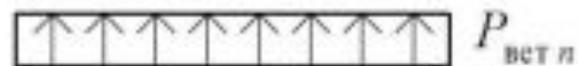
c_{e2} – аэродинамический коэффициент (по п. 6.6. [5], прил. 4 схема 12 б).

- Горизонтальные составляющие избыточного давления и ветровой нагрузки допускается не учитывать

Избыточное давление



Ветровая нагрузка



б) – Нормативные нагрузки, действующие на крышу «снизу вверх»

Расчётная нагрузка по второй комбинации определяется по формуле:

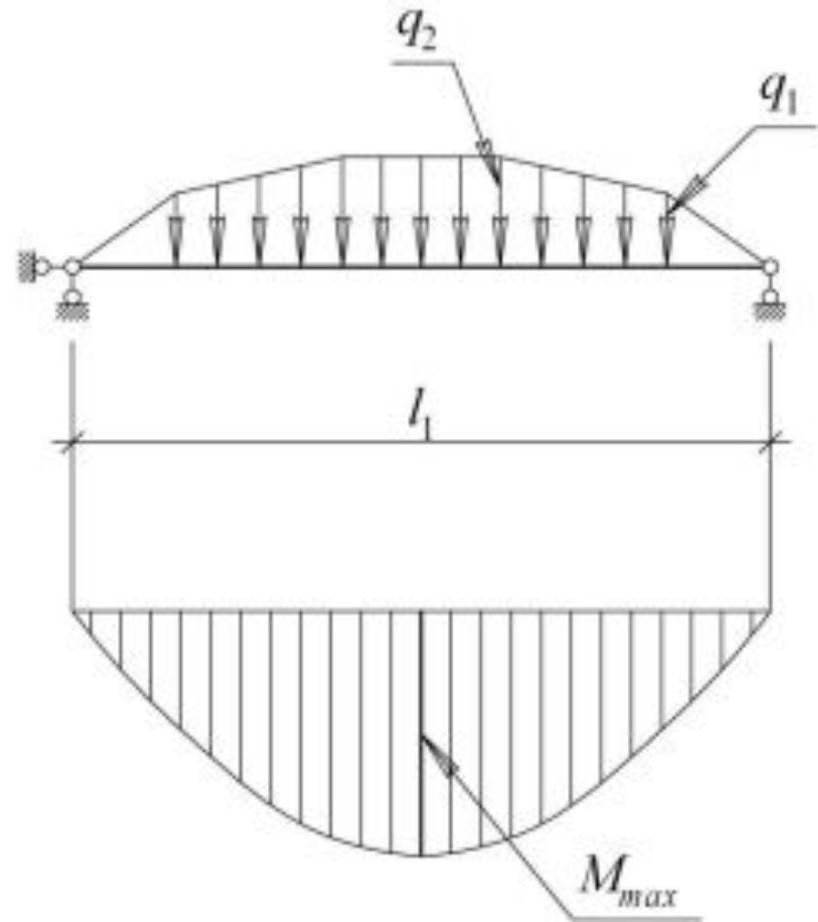
$$q_{\uparrow} = 0,9 \cdot (\gamma_{f_{и}} \cdot P_{иn} + \gamma_{f_{вет}} \cdot P_{ветn}) - G_{On} \cdot \gamma_{fg}, \quad (6.66)$$

где $\gamma_{f_{и}} = 1,2$ – коэффициент надёжности по нагрузке для избыточного давления;

$\gamma_{f_{вет}} = 1,4$ – коэффициент надёжности по ветровой нагрузке [5].

Расчёт поперечных рёбер

- Поперечные рёбра щитов покрытия рассчитываются по схеме простых двухпорных балок, несущих равномерно распределённую нагрузку (комбинация нагрузок, действующих на крышу «сверху вниз»), собираемую с соответствующей грузовой площади.



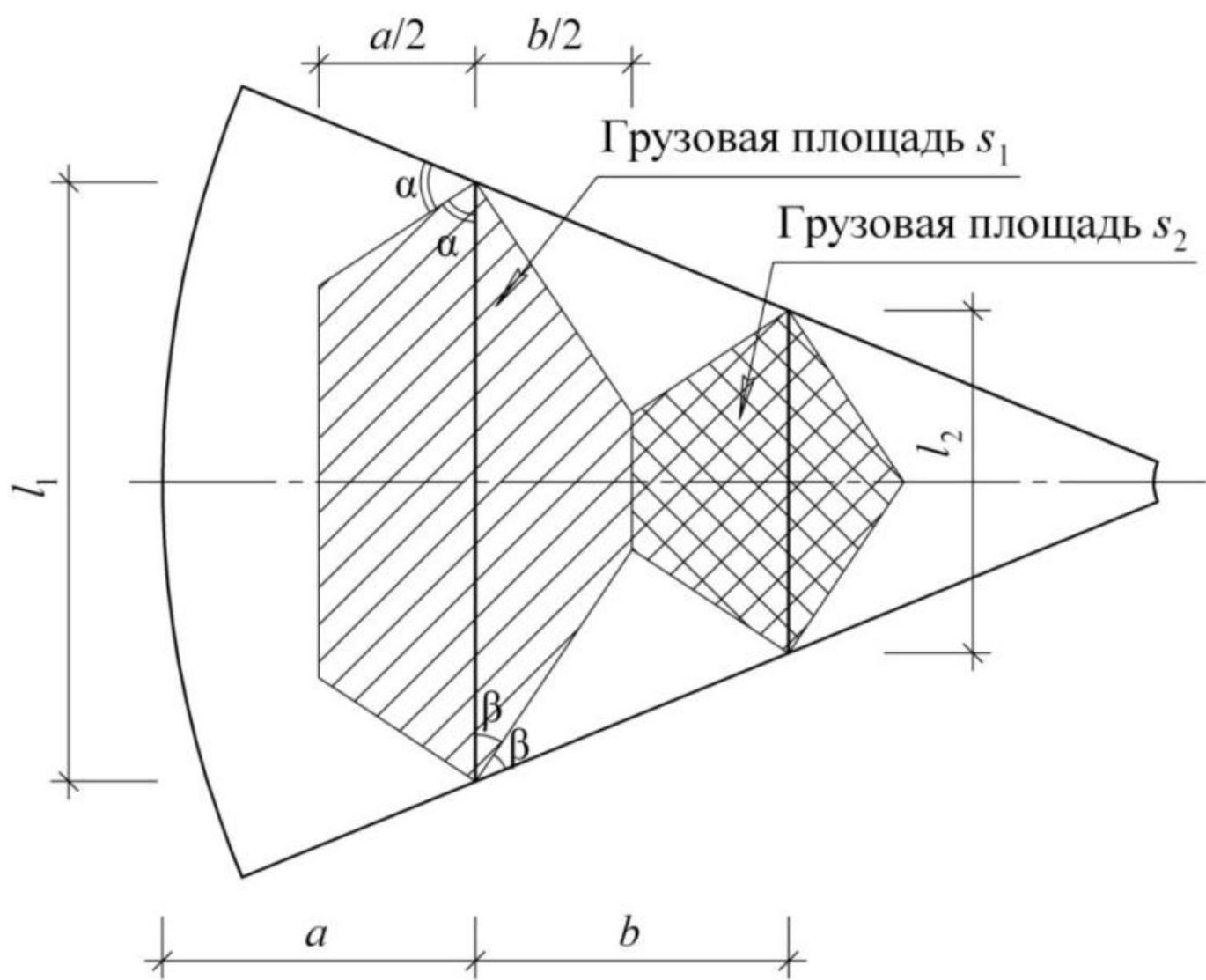


Рис.6.7 – Определение грузовых площадей для поперечных рёбер

- Сечение поперечных рёбер принимается, как правило, из прокатных швеллеров или уголков. Сечение продольного ребра назначается по требуемому моменту сопротивления:

$$W_{\text{треб}} = \frac{M_{\text{max}} \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c}.$$

где R_y – расчётное сопротивление материала;

γ_c – коэффициент условий работы;

γ_n – коэффициент надёжности по назначению.

Поперечное ребро проверяется на прочность по формуле

$$\frac{M}{W} = \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}.$$

- Принятое сечение ребра необходимо проверить по предельному прогибу

Расчёт радиальных рёбер

В щитовых конических и сферических крышах основными несущими элементами являются радиальные рёбра, установленные с шагом по окружности корпуса резервуара b , определяемым дорожным габаритом кровельного щита (рис. 6.9).

Рёбра удобно конструировать из швеллеров, что обусловлено конструкцией щита. В качестве сечения могут быть приняты двутавры.

Расчётное значение нагрузки p определяется по формуле:

$$p = q \cdot b, \quad (6.75)$$

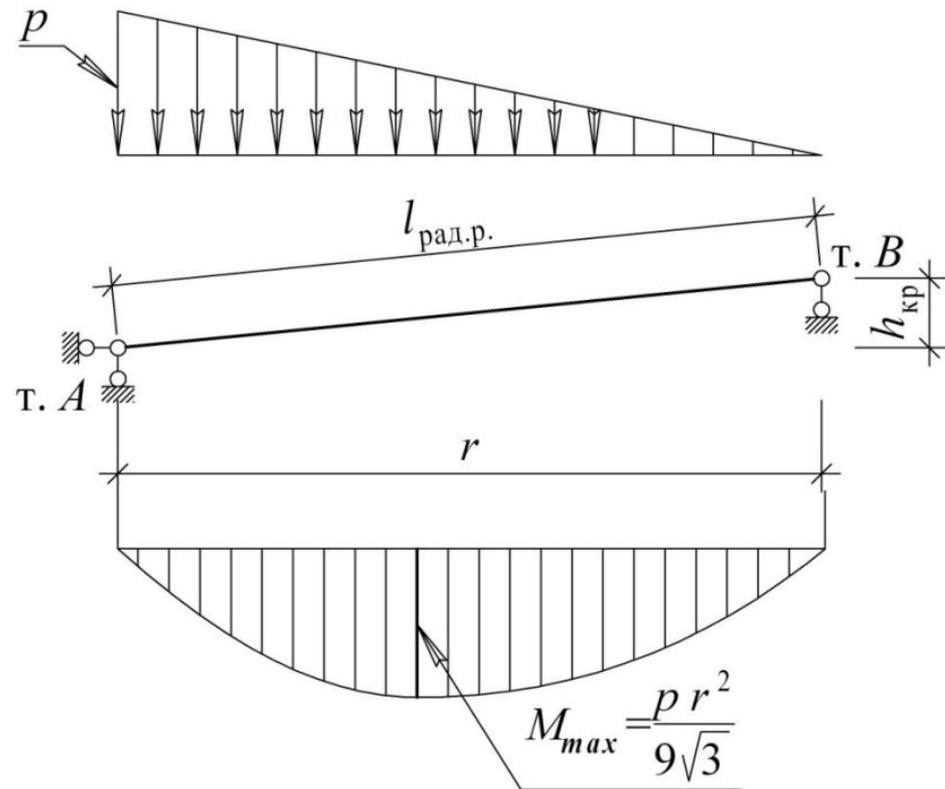
где q – расчётная равномерно распределённая нагрузка по площади;

b – ширина грузовой площади.

Для расчёта принимается комбинация нагрузок с максимальным по модулю значением («сверху вниз» или «снизу вверх»).

Расчёт радиальных рёбер с центральной стойкой

- Расчет радиальных балок щитов при наличии центральной стойки выполняется по схеме просто балки на двух опорах (стенки и центральной стойки), воспринимающей нагрузки от грузовой площади в виде треугольника.



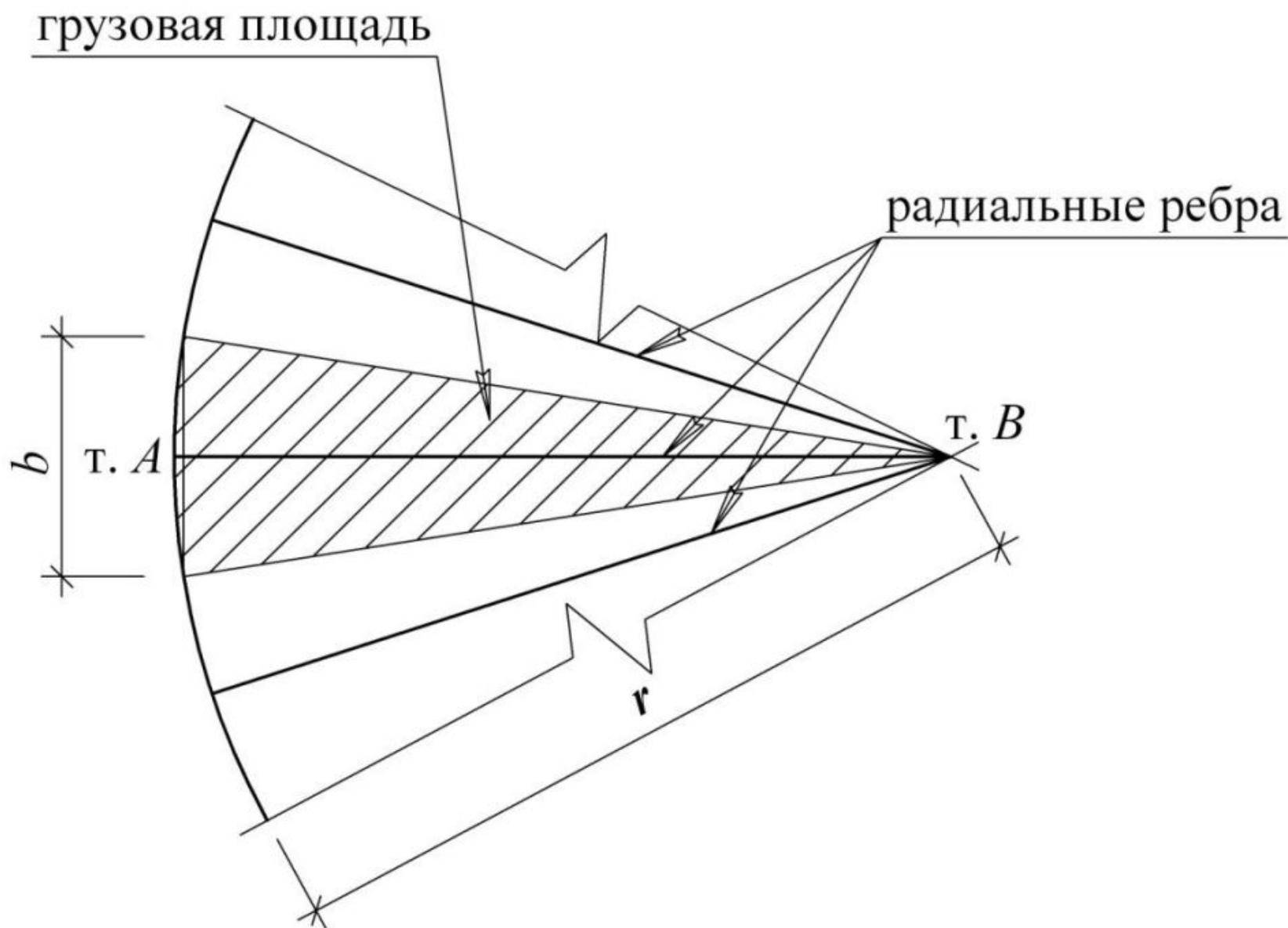


Рис.6.9 – Определение грузовых площадей для радиальных рёбер

Максимальный прогиб шарнирно опертой балки, нагруженной сплошной нагрузкой треугольного вида:

$$f_{max} = \frac{p_n \cdot r^4}{153 \cdot E \cdot I_x}, \quad (6.77)$$

где p_n – нормативное значение нагрузки, определяемое по формуле:

$$p_n = q_n \cdot b, \quad (6.78)$$

q_n – нормативная равномерно распределённая нагрузка по площади;

E – модуль упругости прокатной стали и стальных отливок;

I_x – момент инерции сечения.

Требуемый момент инерции сечения из условия обеспечения жесткости

$$I_{\text{треб}} = \frac{P_n \cdot r^4}{153 \cdot E \cdot [f]}.$$

Радиальное ребро проверяется на прочность:

$$\frac{M}{W} = \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}.$$

Радиальное ребро проверяется на жесткость

$$f_{\text{max}} \leq [f],$$

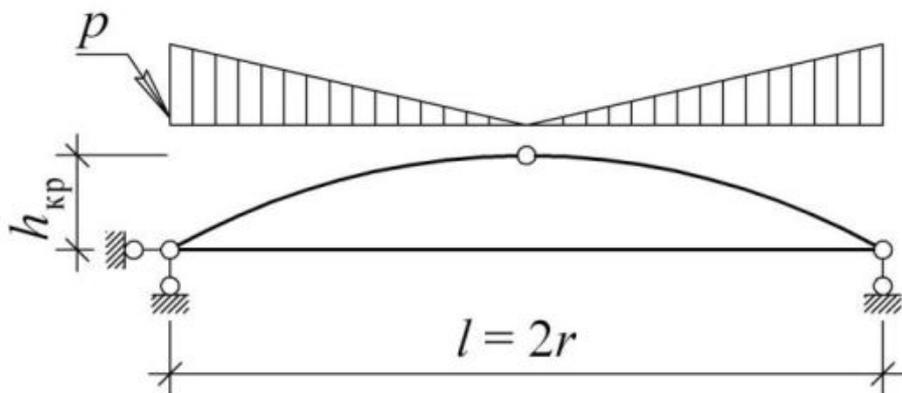
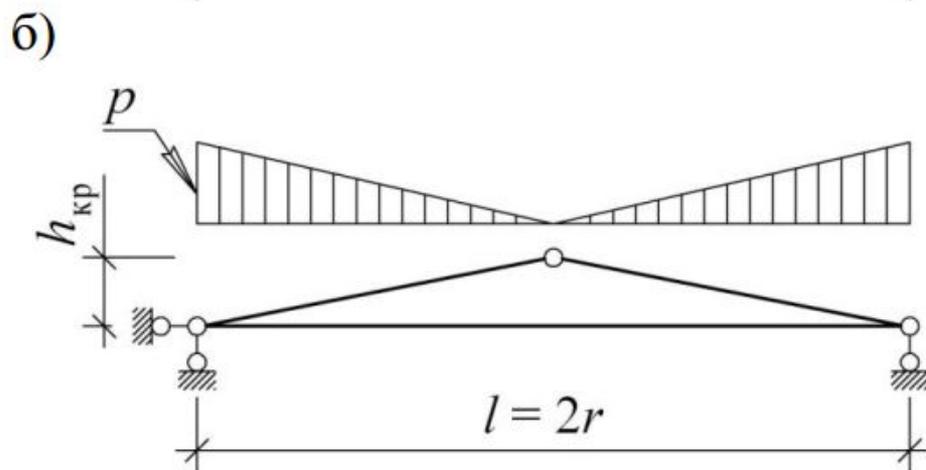
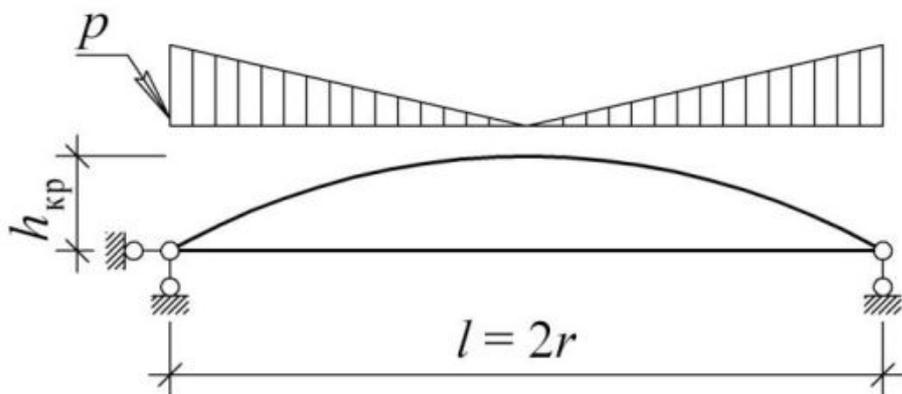
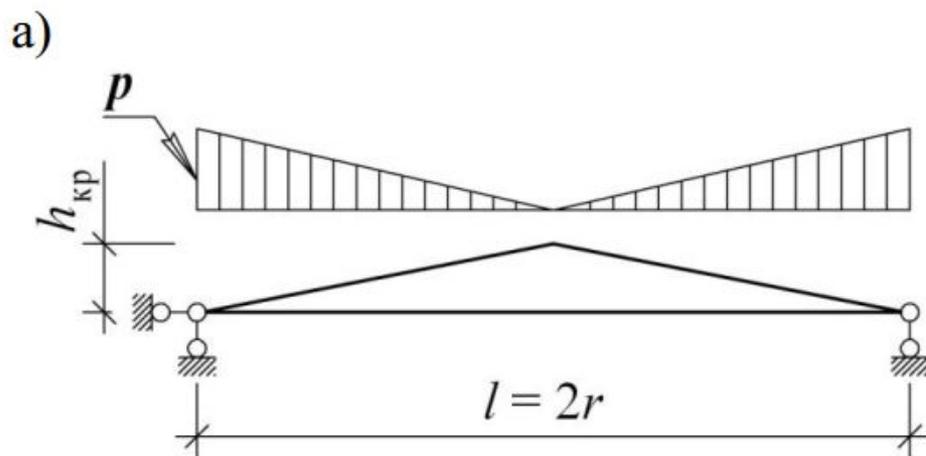
Расчёт радиальных рёбер без центральной стойки

Для резервуаров без центральной стойки щитовая крыша представляет собой распорную конструкцию. Распор вызывает сжимающие усилия в радиальных балках и требует для своего восприятия опорного кольца.

Покрытие расчленяется на отдельные плоские арки, включающие по два диаметрально противоположных ребра.

Радиальные рёбра могут быть рассчитаны по схеме трёхшарнирной или двухшарнирной арки, в зависимости от узла примыкания радиальных рёбер к центральному опорному кольцу. Поскольку покрытие имеет по наружному контуру общее для всех щитов кольцо жёсткости, то оно может рассматриваться как общая затяжка для всех арок. Поэтому каждую арку можно рассчитать как плоскую арку с условной затяжкой (рис. 6.11).

Расчёт может быть выполнен численно с помощью компьютерных программ или аналитически – методами строительной механики.



а) двухшарнирные арки, б) трёхшарнирные арки

Рис.6.11 – Варианты расчётных схем радиальных балок

Конструктивный расчет

Проверку прочности сплошных арок производят как для внецентренно-сжатых элементов при упругой работе стали для наиболее неблагоприятных сочетаний усилий:

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{W_x} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}, \quad (6.106)$$

где N – продольное усилие в радиальном ребре;

A – площадь поперечного сечения ребра;

M – момент в радиальном ребре;

W_x – момент сопротивления сечения;

γ_c – коэффициент условий работы, равный 1.

Проверка устойчивости арки в плоскости действия момента приближенно выполняется как для центрально сжатого стержня:

$$1,4N \leq \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{\mu^2 \cdot s^2}, \quad (6.107)$$

где s – длина полуарки:

для конической кровли $s = l_{\text{рад.р.}} = \sqrt{r^2 + h_{\text{кр}}^2}$;

для сферической кровли $s = \beta \cdot R_{\text{пов}}$,

β – угол в радианах, $\beta = \text{arctg} \frac{r}{R_{\text{пов}} - h_{\text{кр}}}$;

μ – коэффициент расчетной длины, учитывающий кривизну арки и зависящий от отношения стрелки арки к пролёту (табл. 6.10).

Таблица 6.10 – Коэффициенты μ расчётной длины арки

Арка	$h_{кр}/l$			
	0,05	0,2	0,3	0,4
Трехшарнирная	1,2	1,2	1,2	1,3
Двухшарнирная	1	1,1	1,2	1,3

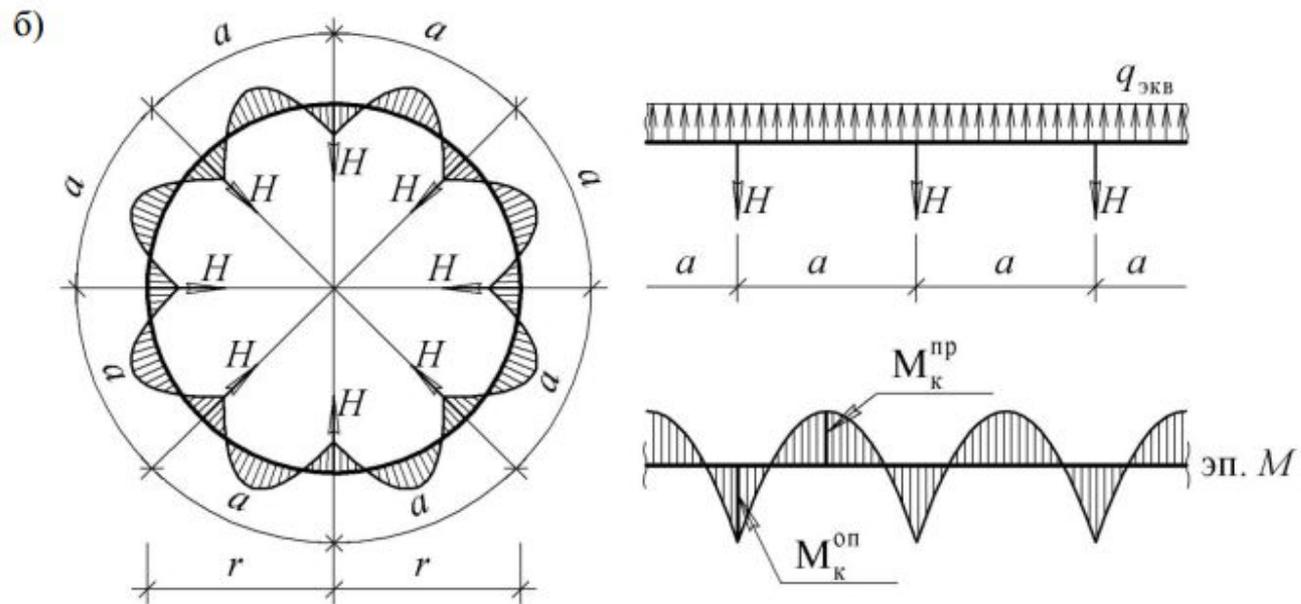
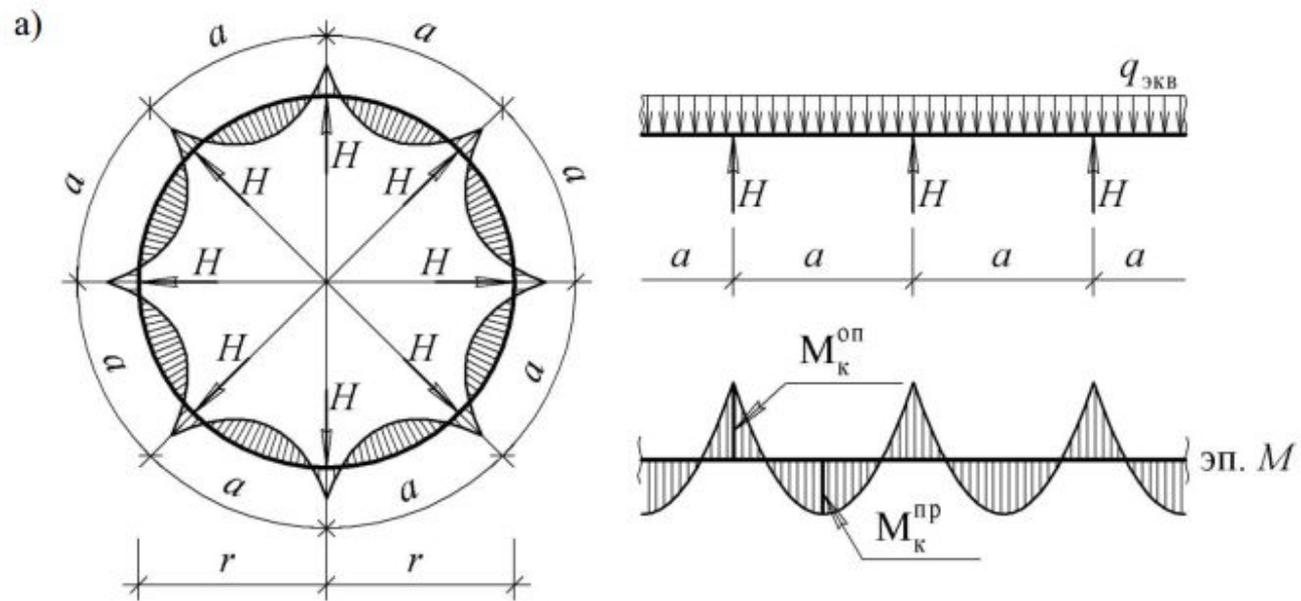
Общая устойчивость арки из плоскости проверяется по формуле (56) [2]:

$$\frac{N}{c \cdot \varphi_y \cdot A} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}. \quad (6.108)$$

Для обеспечения устойчивости сплошной арки из плоскости расстояние между точками закрепления (поперечные ребра) не должно превышать 16-20 ширин пояса [9].

Расчет опорного кольца

Опорное кольцо кровли, располагаемое по верхнему краю стенки резервуара, является одновременно и кольцом жесткости резервуара [19]. Поэтому помимо распора от кровли кольцо воспринимает воздействие вакуума, избыточного давления и ветрового напора на 0,4 высоты стенки [17, 19].

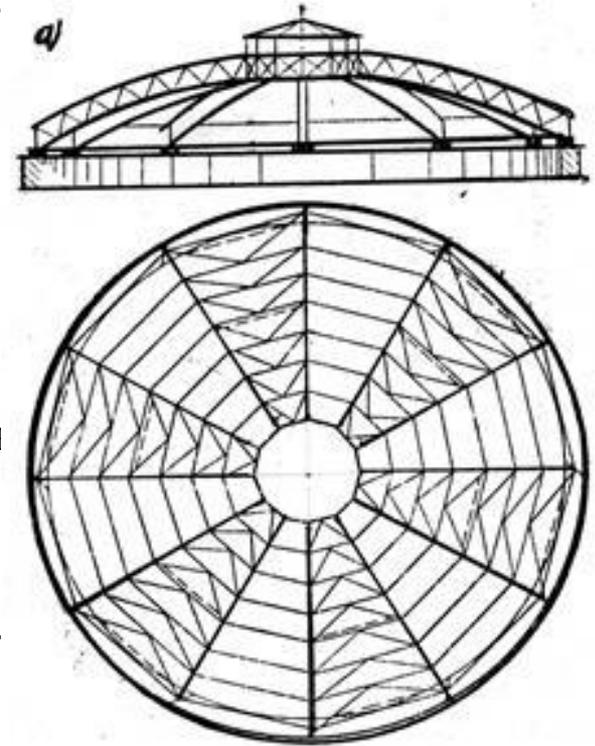


а) при нагрузке «сверху-вниз»; б) при нагрузке «снизу-вверх»

Рис. 6.14 – Расчётные схемы опорного кольца на действие распоров

Расчёт стационарной сферической кровли (ребристо-кольцевой купол)

- Конструкция ребристо-кольцевого купола состоит из плоских криволинейных ребер, установленных в радиальном направлении и соединенных между собой рядом колец, образующих совместную пространственную систему. Жесткость купола на кручение обеспечивается стальным настилом и системой связей.
- Приблизительно статический расчёт сферического ребристо-кольцевого купола можно выполнить, расчленив его на отдельные плоские арки, включающие диаметрально противоположные щиты покрытия. В местах расположения кольцевых прогонов вводят условные затяжки.
- Расчет элементов выполняется аналогично ребристому куполу. Сечения промежуточных колец затяжек проверяются так же, как нижнее опорное кольцо.



Расчёт анкерного крепления корпуса резервуара к основанию

- Анкерное крепление обязательно предусматривается для резервуаров повышенного давления. В резервуарах низкого давления оно устанавливается в случаях, если опрокидывающий момент резервуара от воздействия расчётной ветровой или сейсмической нагрузок превышает восстанавливающий момент.
- Обычно анкерное крепление стенки производится при строительстве резервуара в районе со скоростным напором ветра 0,85-1,00 кПа (VII ветровой район, например, Анадырь, Курильск, Петропавловск-Камчатский, побережья морей, океанов, острова).
- При резервуаре, заполненном на небольшую высоту, возможен отрыв корпуса резервуара от основания под действием внутреннего избыточного давления.

При расчёте анкерного крепления необходимо определить:

- количество болтов,
- расстояние между болтами,
- расстояние между стенкой резервуара и осью анкерных болтов, диаметр болтов (не менее 24 мм),
- размеры, армирование и глубину заложения железобетонной плиты для крепления анкера,
- размеры опорного столика,
- размеры кольца жесткости, подкрепляющего стенку.

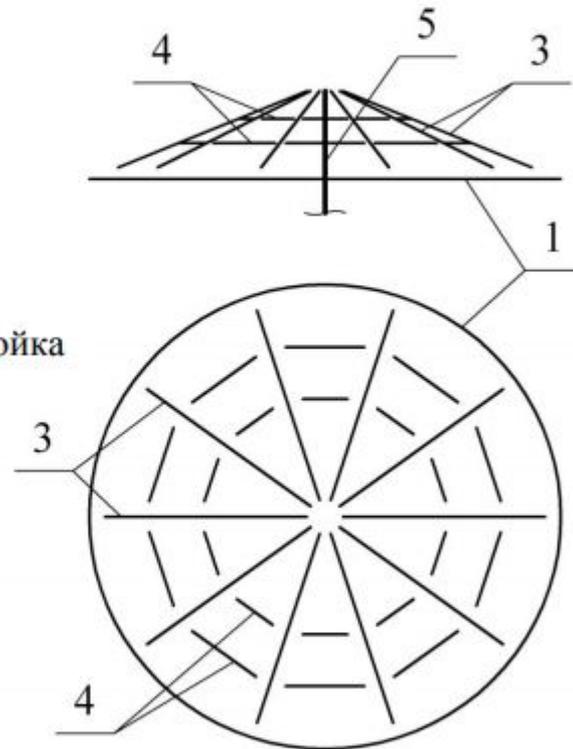
Расчёт центральной стойки

- Центральная стойка является постоянным несущим элементом при безраспорной системе крыши. Радиальные балки щита в таком случае опираются, с одной стороны, на стенку, а с другой, на оголовок центральной стойки

1 – нижнее опорное кольцо;

3 – продольные рёбра;

4 – поперечные рёбра; 5 – центральная стойка



Расчет центральной стойки производится на центрально приложенную осевую силу:

$$N_c = R \cdot n,$$

R – реакция шарнирно опертой радиальной балки

$$R = \frac{P \cdot r}{6};$$

n – количество щитов.

Используются трубчатые или решётчатые стойки.

Расчёт стойки на устойчивость, как для центрально сжатого элемента, выполняется по формуле:

$$\frac{N_c}{\varphi \cdot A_c} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}.$$

Сжатая стойка проверяется по гибкости:

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i_c} \leq \lambda_u = 180 - 60\alpha.$$

Диаметр оголовка и базы стойки принимается с учётом условий опирания щитов покрытия и использования стойки для рулонирования элементов резервуара (стенки или днища) на заводе-изготовителе.

Библиографический список

- ТКП 45-5.04-172-2010 «Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов. Правила проектирования и устройства»
- СТО-СА-03-002-2009 «Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов»
- А. А. Лапшин, А. И. Колесов, М. А. Агеева «Конструирование и расчёт вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления». Учебное пособие