

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ

СТ-460034 (ПГС-2)

Селезнева Е.Д.

Орлова Е.А.

Романов А.А.

Родионова Е.Д.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СООРУЖЕНИИ

Вертикальные резервуары - это сосуды, предназначенные для хранения жидкостей бытового и промышленного назначения. Вертикальные резервуары и емкости нашли широкое применение в промышленности для хранения жидкостей (таких как нефть, вода, масла, керосин и т.д.) и газов и позволяют создавать емкостные хранилища любого объёма и назначения. Являются наиболее ответственным сооружением.



КЛАССИФИКАЦИЯ

По назначению вертикальные резервуары бывают:

- водяные
- нефтяные
- для сжиженных газов
- для химических продуктов и др.

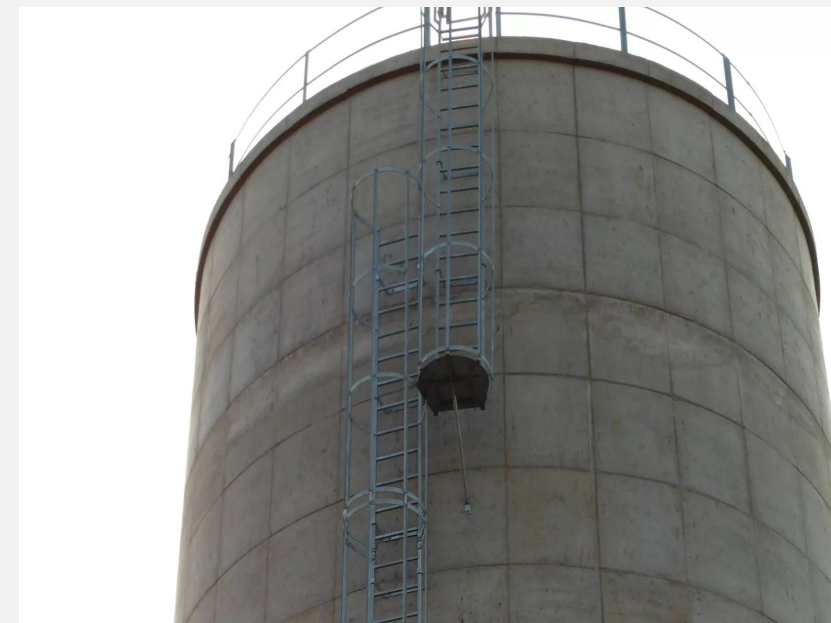


По основному материалу, используемому для изготовления, вертикальные резервуары бывают:

- металлические
- неметаллические (резиноканевые, стеклопластиковые, железобетонные и др.)
- подземные емкости глубокого заложения

Резервуары последней группы создаются по специальной технологии и располагаются в солевых отложениях, пластах крупнообломочных пород и в тугопластичных пластах.

ГОСТ 19281-89 «Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия»



По расположению относительно планировочной высотной отметки:

- надземные резервуары, днище которых расположено выше планировочной высотной отметки
- наземные резервуары, днище которых находится на поверхности естественного основания.
- подземные резервуары-емкости, удовлетворяющие следующему условию: разница между максимальным уровнем хранимого продукта и планировочной высотной отметкой не превышает 0,2 м.



По оперативному использованию:

- резервуары длительного хранения
- отстойники
- емкости для смешения
- емкости для непрерывного выполнения технологических операций и др.

По величине рабочего избыточного давления выделяют следующие типы резервуаров:

- атмосферные, где избыточное давление равно нулю;
- низкого давления, где рабочее давление не превышает 2 кПа и вакуум до 0,25 кПа;
- повышенного избыточного давления (до 70 кПа).

По температурному режиму хранения и эксплуатации резервуары подразделяют на:

- используемые при температуре окружающего воздуха
- эксплуатируемые с дополнительным подогревом хранимого продукта
- изотермические резервуары, используемые для хранения продукта при отрицательных температурах.



В зависимости от **объема и места расположения** резервуары наземного расположения для нефти и нефтепродуктов делятся на 3 класса опасности (согласно «Правилам устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» (ПБ 03-381-00)):

- I класс – особо опасные объемом $V \geq 10\,000\text{ м}^3$, а также объемом $V \geq 5\,000\text{ м}^3$, расположенные непосредственно по берегам рек, крупных водоемов и в черте городской застройки;
- II класс – резервуары повышенной опасности объемом $V=5\,000-10\,000\text{ м}^3$;
- III класс – опасные резервуары объемом $V=100-5\,000\text{ м}^3$.

Степень опасности учитывается при проектировании специальными требованиями к материалам, а также коэффициентом надежности по назначению:

- класс I - $\gamma_n = 1,1$;
- класс II - $\gamma_n = 1,05$;
- класс III - $\gamma_n = 1,0$.



**ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ
РЕЗЕРВУАРЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Конструкция днищ

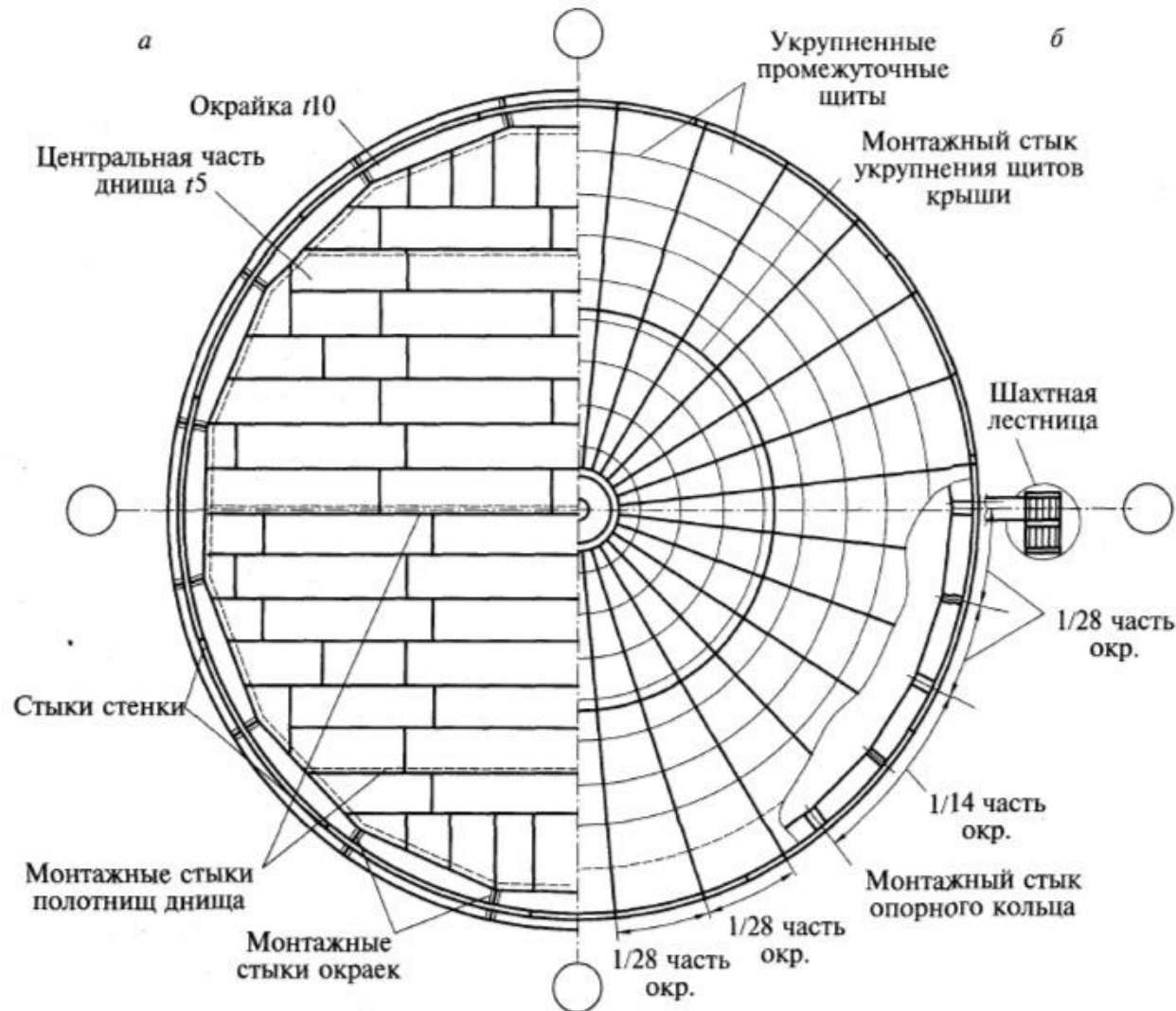


Рис. 23.5. План днища (а) и стационарной крыши (б) вертикального цилиндрического резервуара

Толщину принимают 5 мм при объемах до 10 000 м³ и 6 мм при больших объемах.

Полотнища сваривают, как правило, из листов размером 1500 x 6000 мм, их ширина не превышает 12 м

Конструкция стенок

По рекомендациям ПБ 03-381-11 все корпуса резервуаров для нефти и нефтепродуктов объемом более $10\,000\text{ м}^3$ делают листовым методом для обеспечения их надежности и долговечности.

Для стенок применяют листы стали толщиной 5-40 мм, шириной 1500-2000 мм и длиной 6000-8000 мм с обрезными кромками.

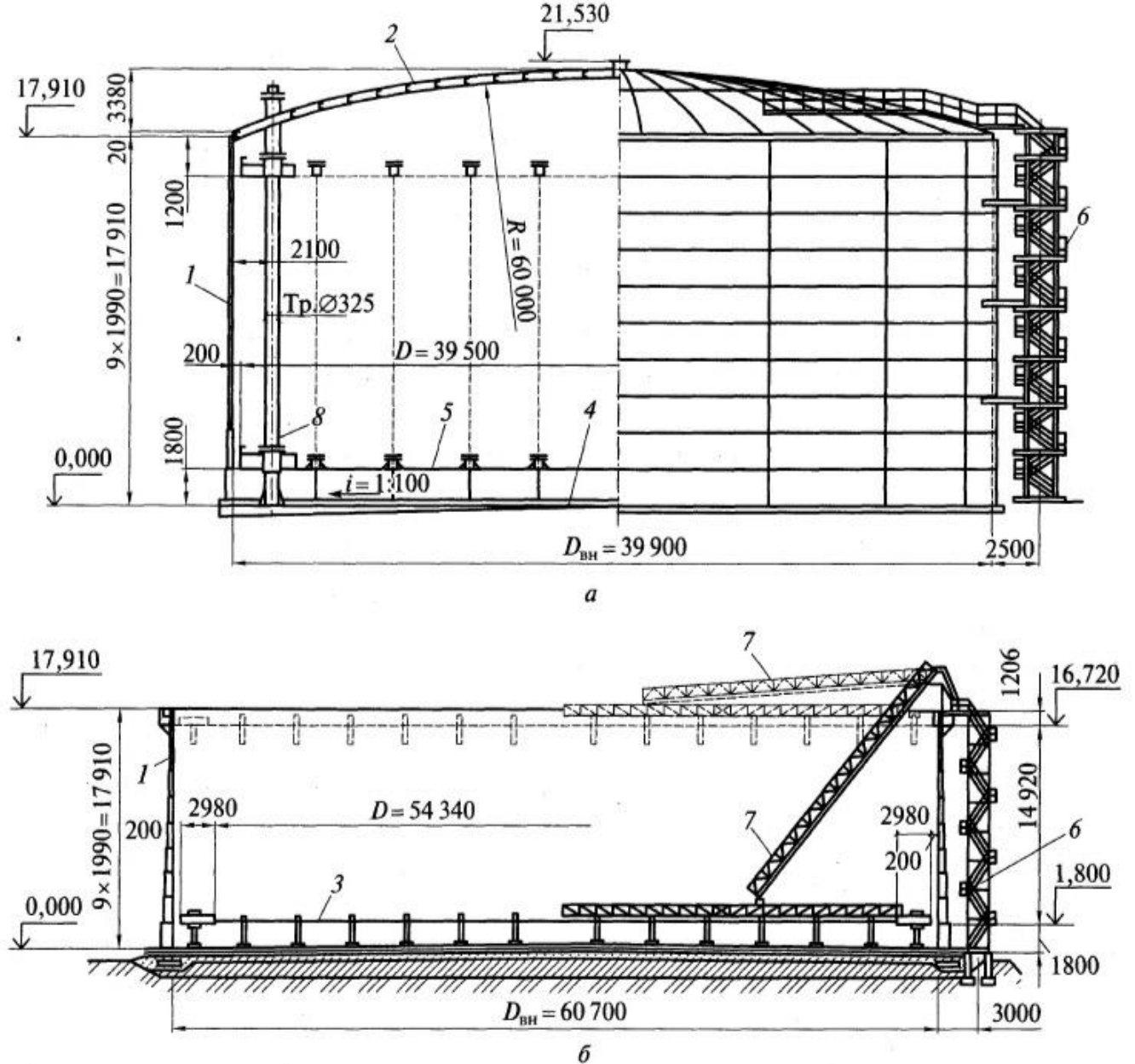


Рис. 23.3. Вертикальные цилиндрические резервуары:

a — со стационарной крышей объемом $20\,000\text{ м}^3$; *b* — с плавающей крышей объемом $50\,000\text{ м}^3$;
1 — корпус; *2* — стационарная крыша; *3* — плавающая крыша; *4* — днище; *5* — понтон; *6* — шахтная лестница; *7* — катущая лестница; *8* — направляющая стойка

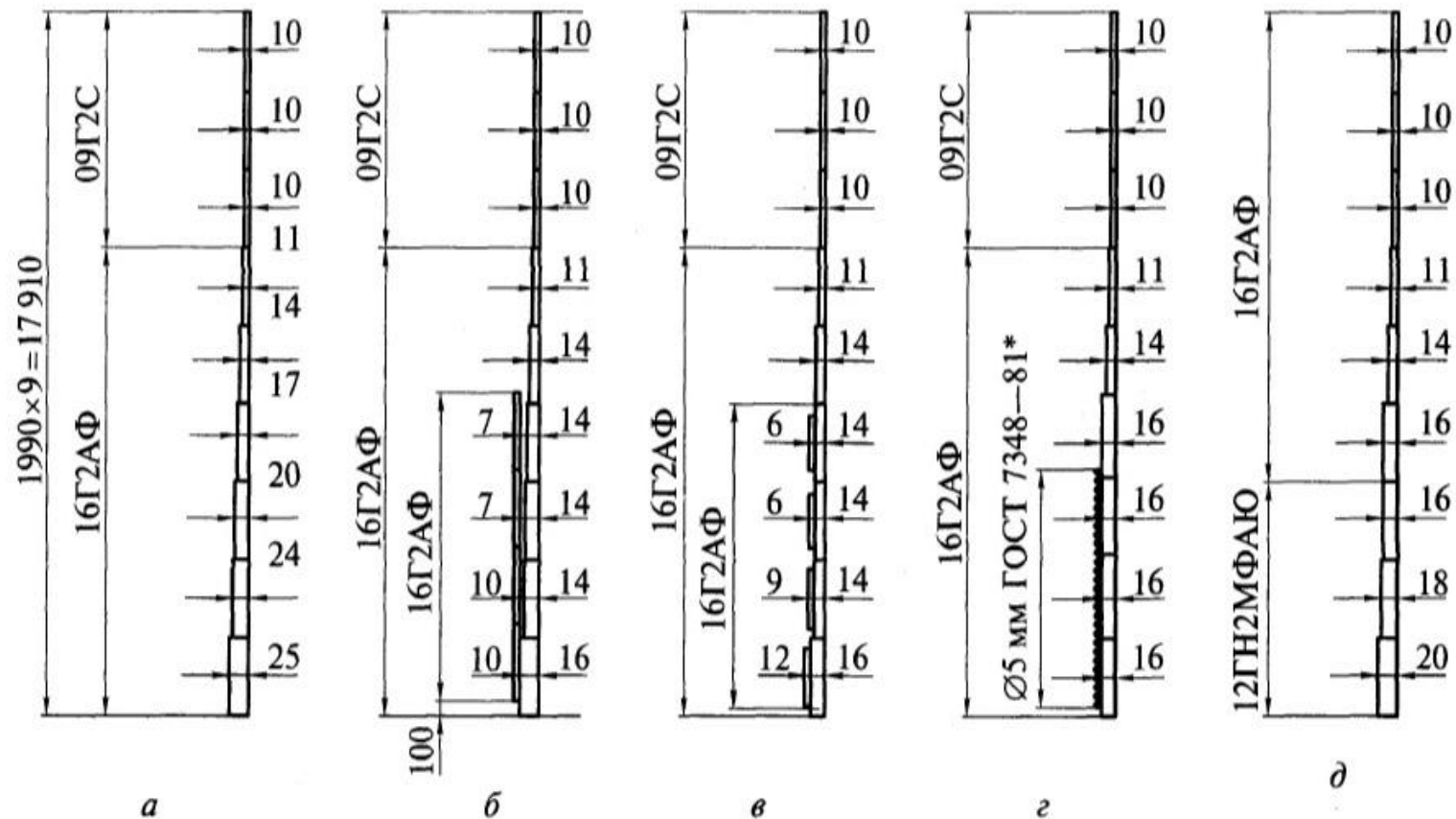


Рис. 23.6. Варианты стенки резервуаров объемом 100 000 м³:

a — комбинированная; *б* — двухслойная; *в* — усиленная бандажами; *г* — с предварительно напряженной обмоткой; *д* — однослойная рулонированная

Минимальная толщина принимается 4-5 мм по соображениям долговечности и выполнения сварочных работ. Смежные пояса стенки толщиной от 5 до 20 мм могут иметь разницу толщин не более 2 мм, толщиной 22-30 мм – не более 3 мм.

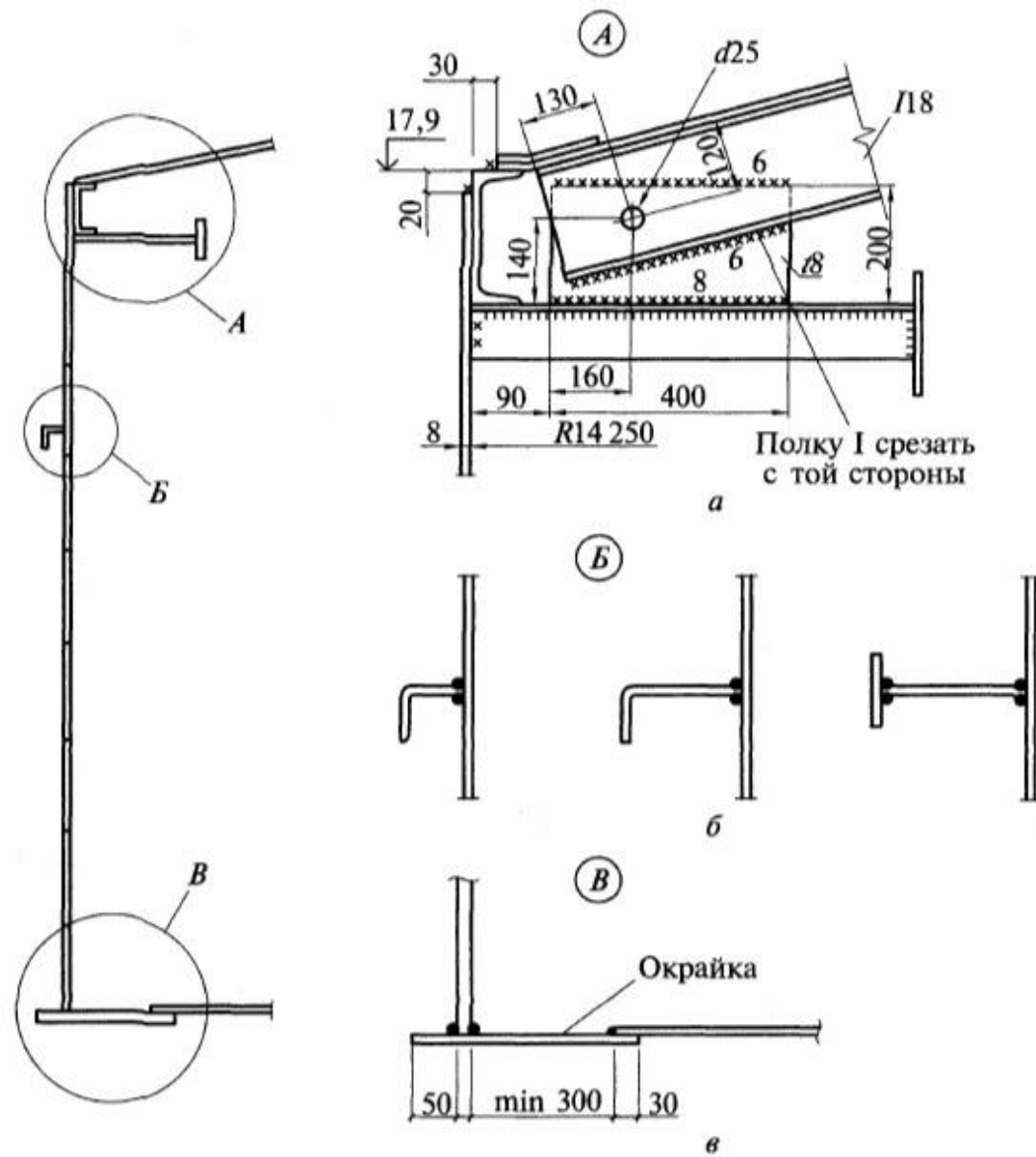


Рис. 23.7. Основные узлы корпуса резервуара:

a — узел сопряжения стенки с крышей; *б* — варианты сечений промежуточных колец жесткости; *в* — узел сопряжения стенки с дном

Конструкция крыши

Крыша бывает стационарной и плавающей, этот выбор зависит от диаметра резервуара, жидкости, которая хранится в нем, и также от климатического района

Стационарные крыши бывают 3-х типов: ребристая коническая, ребристая сферическая и купольная сетчатая.

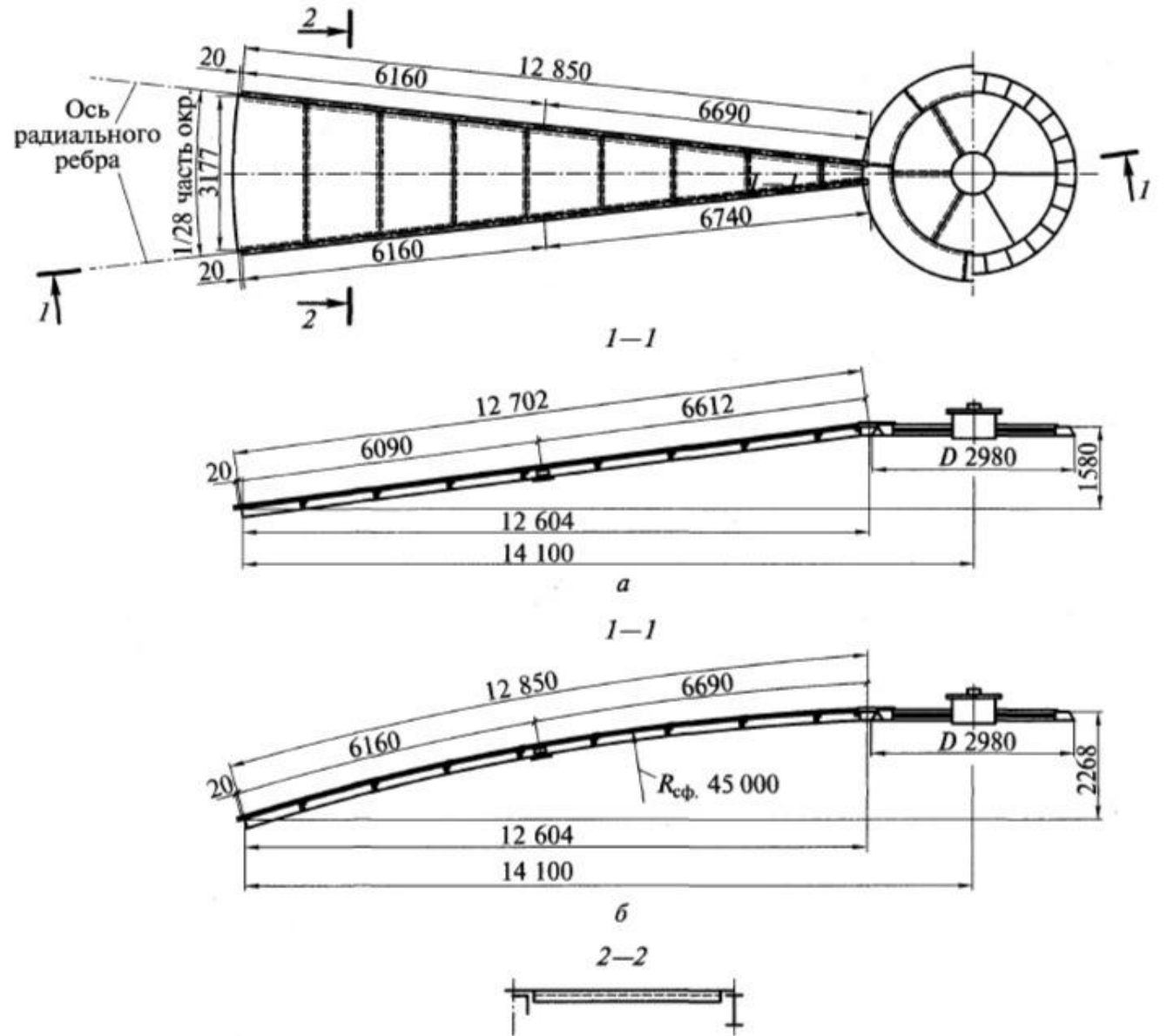
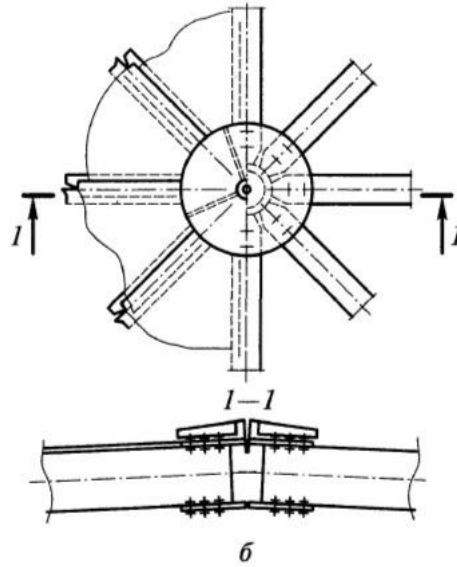
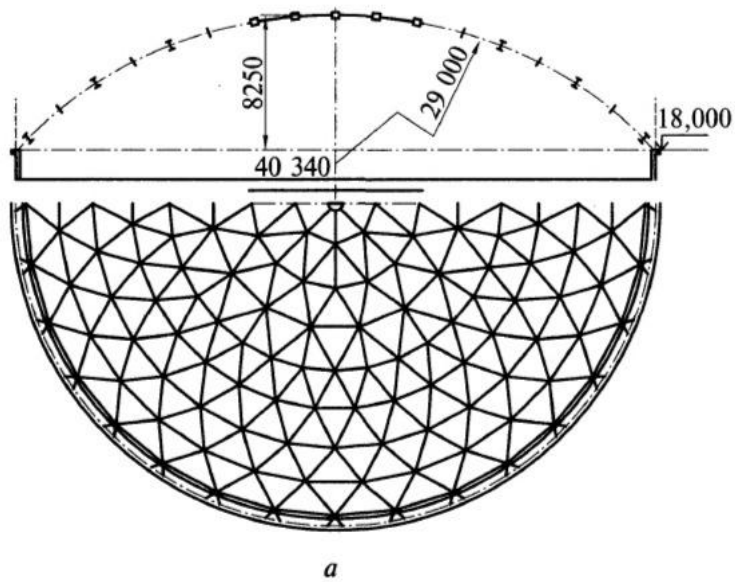


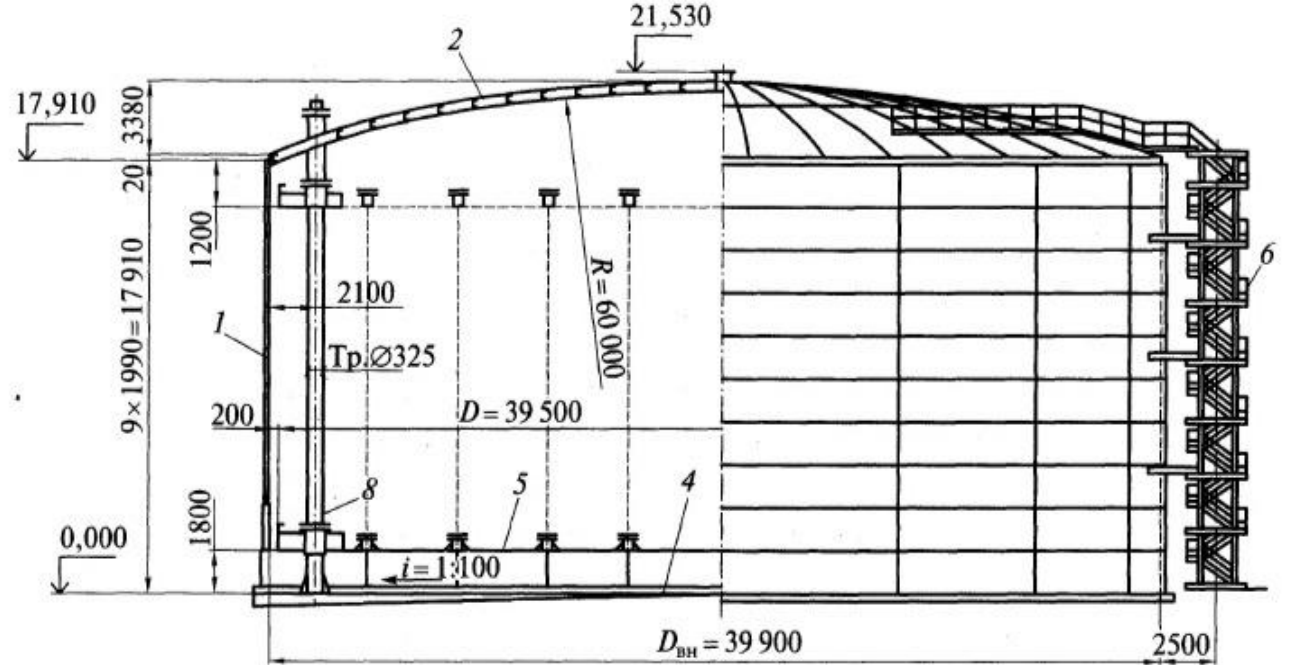
Рис. 23.9. Секторный и центральный щит крыши резервуара объемом 5000 м³:
а — для конической крыши; б — для сферической крыши



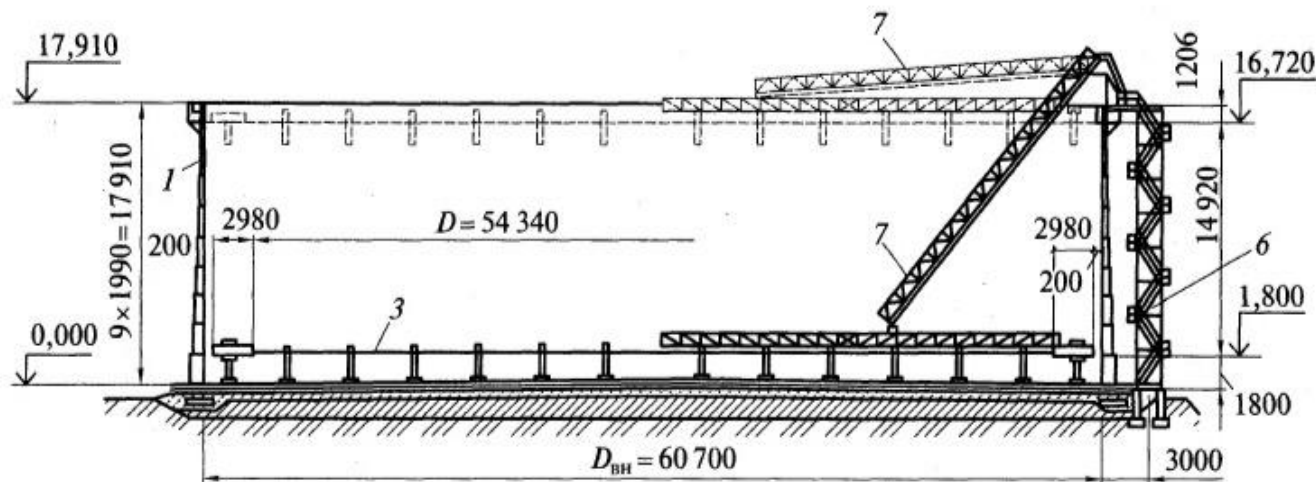
Сетчатый каркас купола:

а - схема каркаса; б - центральный узел соединения элементов каркаса





a

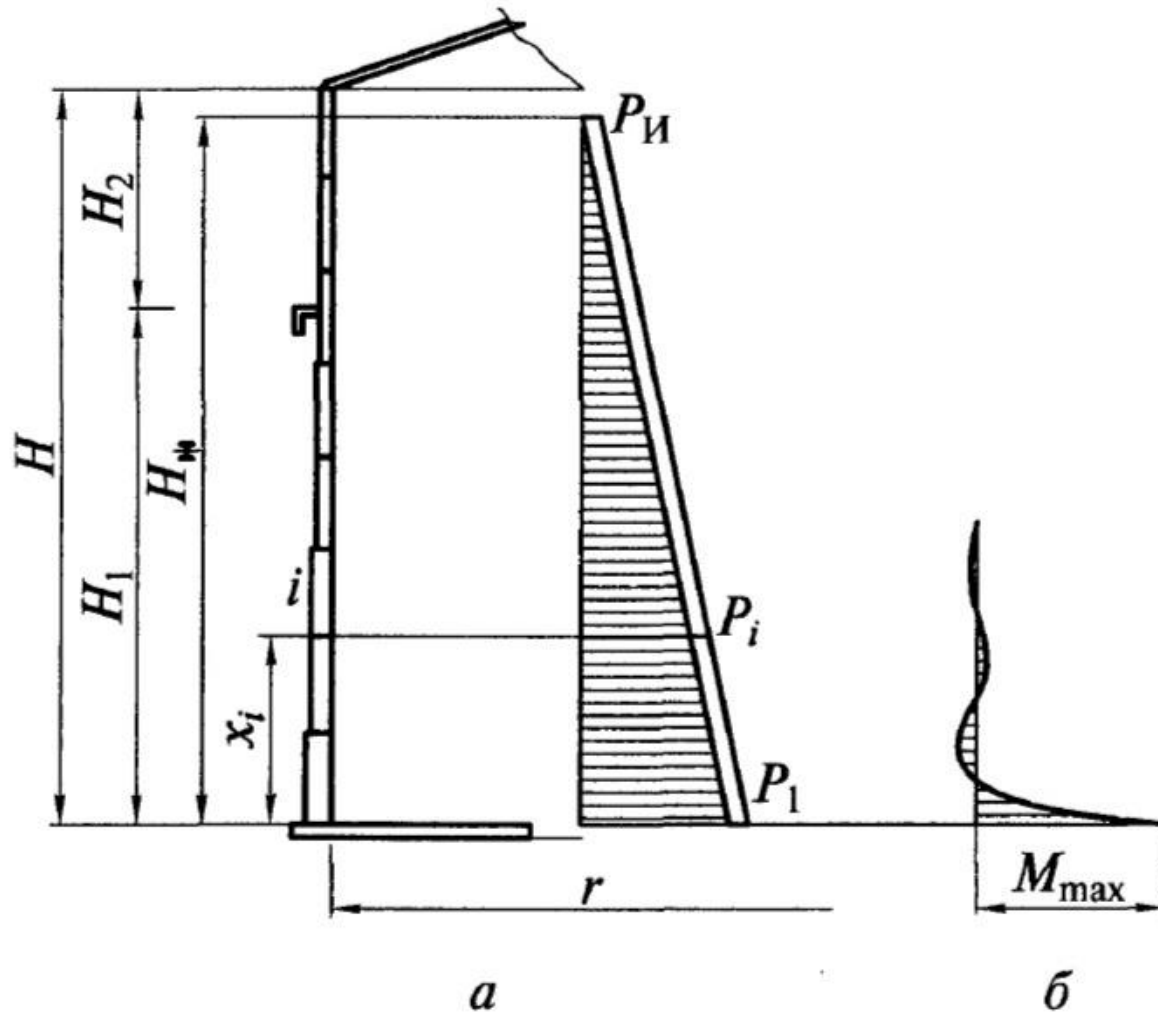


b

Рис. 23.3. Вертикальные цилиндрические резервуары:

a — со стационарной крышей объемом 20 000 м³; б — с плавающей крышей объемом 50 000 м³;
 1 — корпус; 2 — стационарная крыша; 3 — плавающая крыша; 4 — днище; 5 — понтон; 6 —
 шахтная лестница; 7 — катучая лестница; 8 — направляющая стойка

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАРЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ: РАСЧЕТ СТЕНКИ



Расчетная схема стенки
вертикального цилиндрического
резервуара:

а - гидростатическое и избыточное
давление на стенку;

б - краевой эффект в узле
сопряжения стенки с дном

Требуемую толщину стенки в каждом поясе можно определить из следующего условия прочности i -го пояса:

$$\sigma_2 = \frac{P_i \cdot r}{t} \leq R_{wy} \frac{\gamma_c}{\gamma_n},$$

P_i — внутренне давление на i -м поясе от хранимой жидкости и избыточного давления паров;

$R_{wy} = R_y$ — расчетное сопротивление сварного шва при физических методах контроля;

$\gamma_c = 0,7$ — коэффициент условий работы для нижнего пояса, для остальных поясов он равен $0,8$;

$\gamma_n = 1 \dots 1,1$ — коэффициент надежности по назначению, который зависит от класса опасности резервуара.

Проверка прочности верхних наиболее тонких поясов стенки с учетом работы их в вертикальном направлении при наличии стационарной крыши и всех связанных с ней нагрузок (массы крыши, оборудования, утеплителя, снега, избыточного давления) производится по формуле:

$$\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \leq R_{wy} \frac{\gamma_c}{\gamma_n}$$

σ_1 — продольное (вертикальное) сжимающее напряжение от указанных расчетных нагрузок;

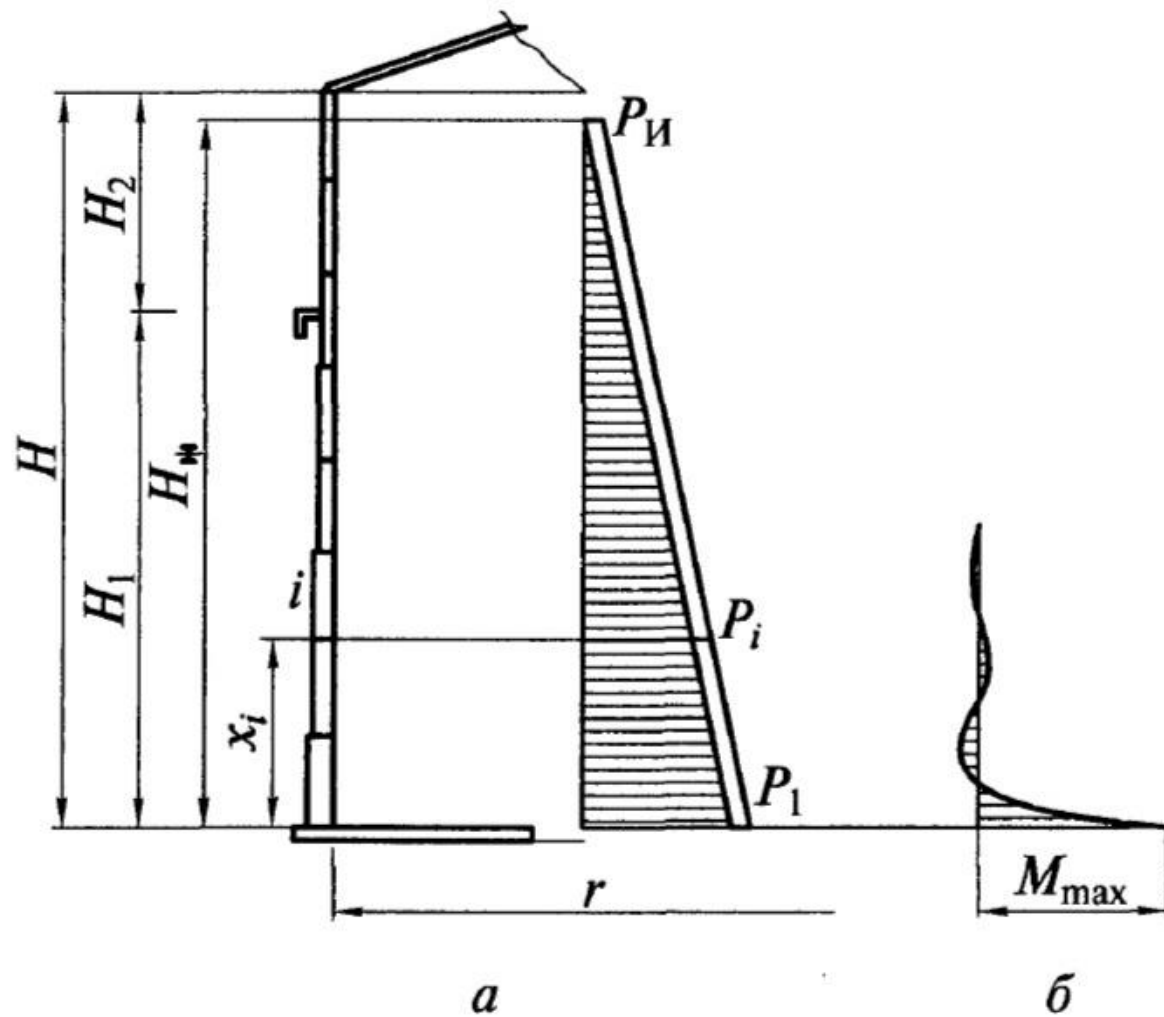
σ_2 — кольцевое растягивающее напряжение от гидравлического и избыточного давления продукта.

Проверка верхних поясов на устойчивость производят по формуле, при этом рассматривается пустой резервуар с внутренним вакуумом, и сжатие стенки в продольном направлении возникает при учете массы вышерасположенной стенки и массы стационарной крыши с установленным на ней оборудованием и утеплителем, нагрузки от снега и вакуума:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \leq 1$$

σ_1 и σ_2 — напряжения в оболочке, соответственно, в вертикальном и кольцевом направлении от постоянной и снеговой нагрузки, а также от вакуума и ветра;

σ_{cr1} и σ_{cr2} — соответствующие критические напряжения (определяются по нормативным документам).



В зоне сопряжения стенки с дном за счет стесненности свободных радиальных перемещений стенки возникает изгибающий момент, который быстро затухает по мере удаления от узла (на рисунке под буквой б).

Максимальная величина его на единицу длины окружности резервуара определяется по приближенной формуле:

$$M_{max} = 0,1P_i r t_i$$

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАРЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ: РАСЧЕТ СТАЦИОНАРНЫХ КРЫШ

Основной расчет производится с учетом следующих равномерно распределенных по площади крыши нагрузок и их сочетаний:

$$P_1 = 1,05g_{кр} + 1,2g_y + \psi(s + 1,2P_{вак}).$$

Дополнительно составляется сочетание нагрузок противоположного направления, т.е. действующих снизу вверх:

$$P_2 = 0,9g_{кр} - \psi(1,2P_{и} + 1,4w_0 \cdot k \cdot c_{e2}).$$

Оно учитывается только в случае $p'_2 < 0$.

В этих формулах:

$g_{кр}$ — нагрузка на 1 м^2 от массы крыши и оборудования на ней;

g_y — нагрузка на 1 м^2 от массы утеплителя;

s — расчетное значение массы снегового покрова;

$P_{вак}$ — нормативная нагрузка от вакуума;

$P_{и}$ — нормативное избыточное давление;

w_0 — нормативное значение ветрового давления;

k — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте;

c_{e2} — аэродинамический коэффициент;

ψ — коэффициент сочетания нагрузок.

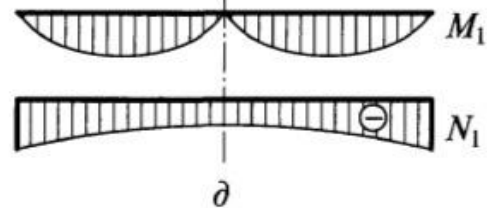
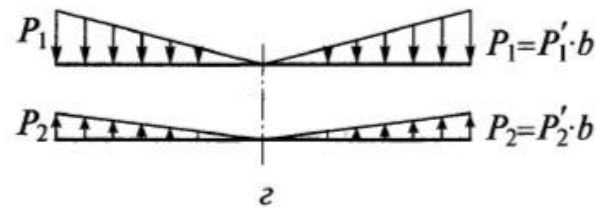
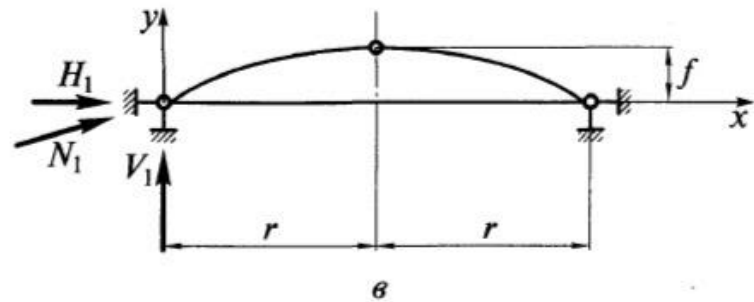
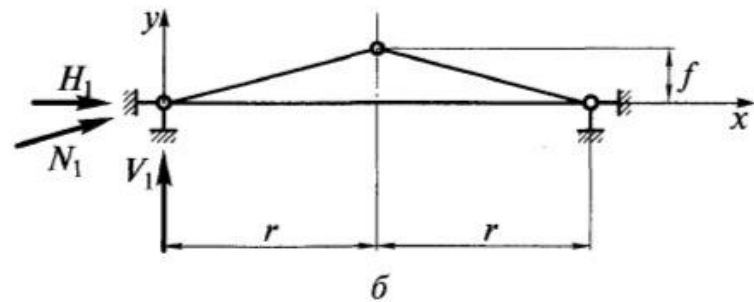
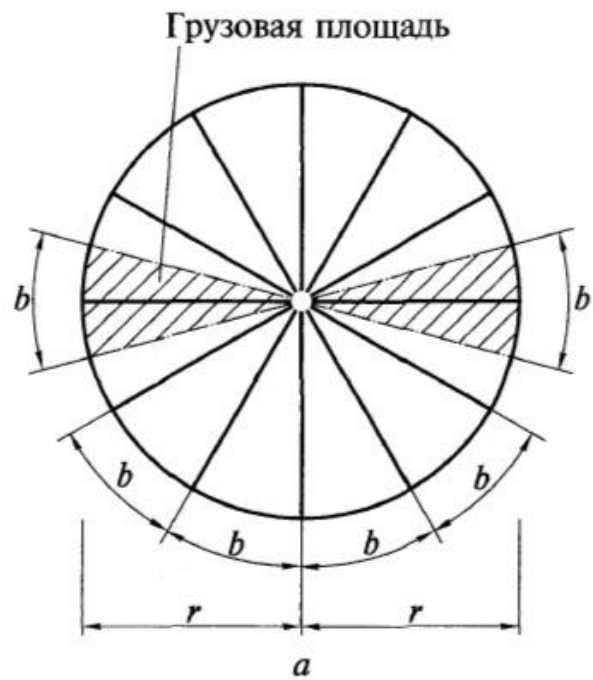


Рис. 23.15. Расчетная схема ребристой крыши:

a — план ребер; b — расчетная схема ребер конической крыши; $в$ — расчетная схема ребер сферической крыши; $г$ — расчетные погонные нагрузки на арку; $д$ — эпюры M_1 и N_1 в ребрах от нагрузки P_1

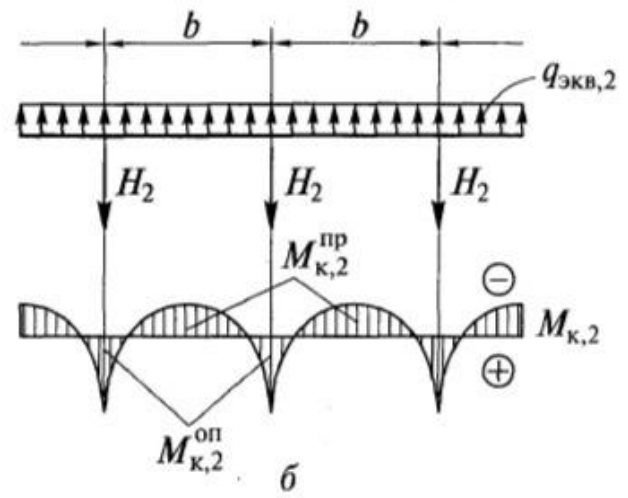
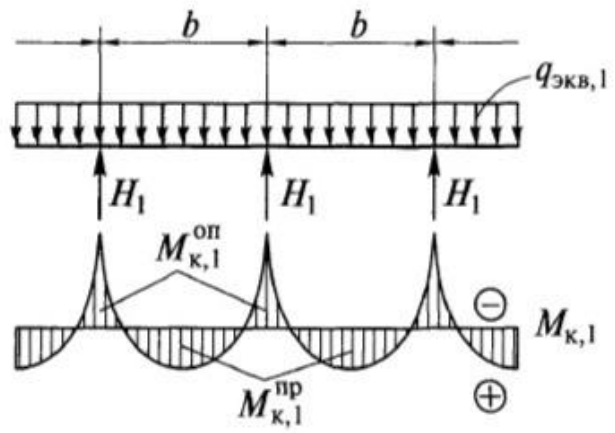
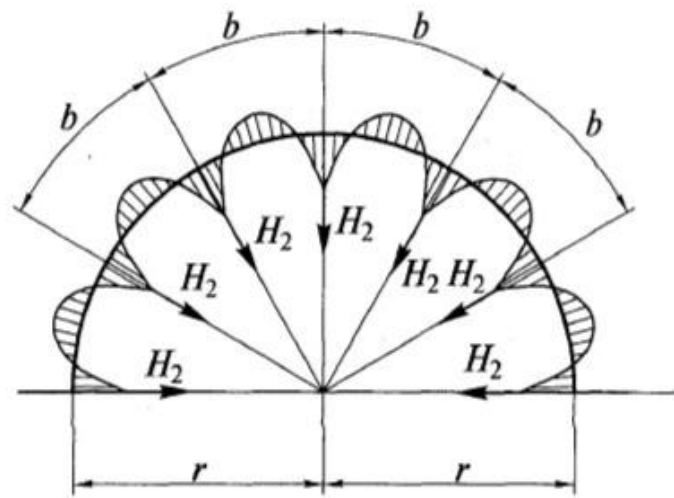
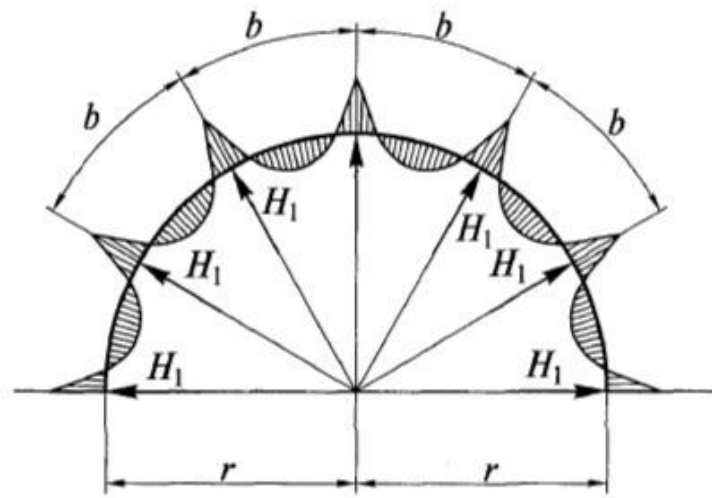


Рис. 23.16. Расчетная схема опорного кольца:

a — при основном сочетании нагрузок; *б* — при дополнительном сочетании нагрузок

Усилие растяжения кольца:

$$N_{к,1} = H_1 \frac{r}{b}$$

Максимально изгибающие моменты в кольце:

$$M_{к,1}^{оп} = -\frac{q_{экв,1}}{12} = -\frac{H_1 b}{12}$$

Проверка прочности кольца производится по формуле:

$$\sigma = \frac{N_{к,1}}{A_{к}} + \frac{M_{к,1}^{оп}}{W_{к}} \leq R_{y}\gamma_{c},$$

где $A_{к}$ – расчетная площадь сечения кольца, определяемая конструкцией кольца и включающая в себя площадь поперечного сечения самого кольца, а также примыкающего к нему участка верхнего пояса стенки резервуара шириной, равной $0,65t \sqrt{\frac{E}{R_{y}}}$, t – толщина стенки верхнего пояса;

$W_{к}$ – момент сопротивления сечения кольца.

Если в крыше возникают дополнительное сочетание нагрузок, то есть нагрузки, направленные снизу вверх, то опорное кольцо при такой нагрузке сжато силой $N_{к,2}$ и имеет расчетные изгибающие моменты в узлах крепления радиальных ребер $M_{к,2}^{оп}$. Поэтому оно проверяется на устойчивость в радиальном направлении по формуле:

$$\sigma = \frac{N_{к,2}}{\varphi_e A_k} \leq R_y \gamma_c,$$

где φ_e — коэффициент устойчивости при внецентренном сжатии.

Максимальный изгибающий момент
в ребре определяется по формуле:

$$M_{max} = \frac{P'_1 \cdot d \cdot l^2}{12}.$$

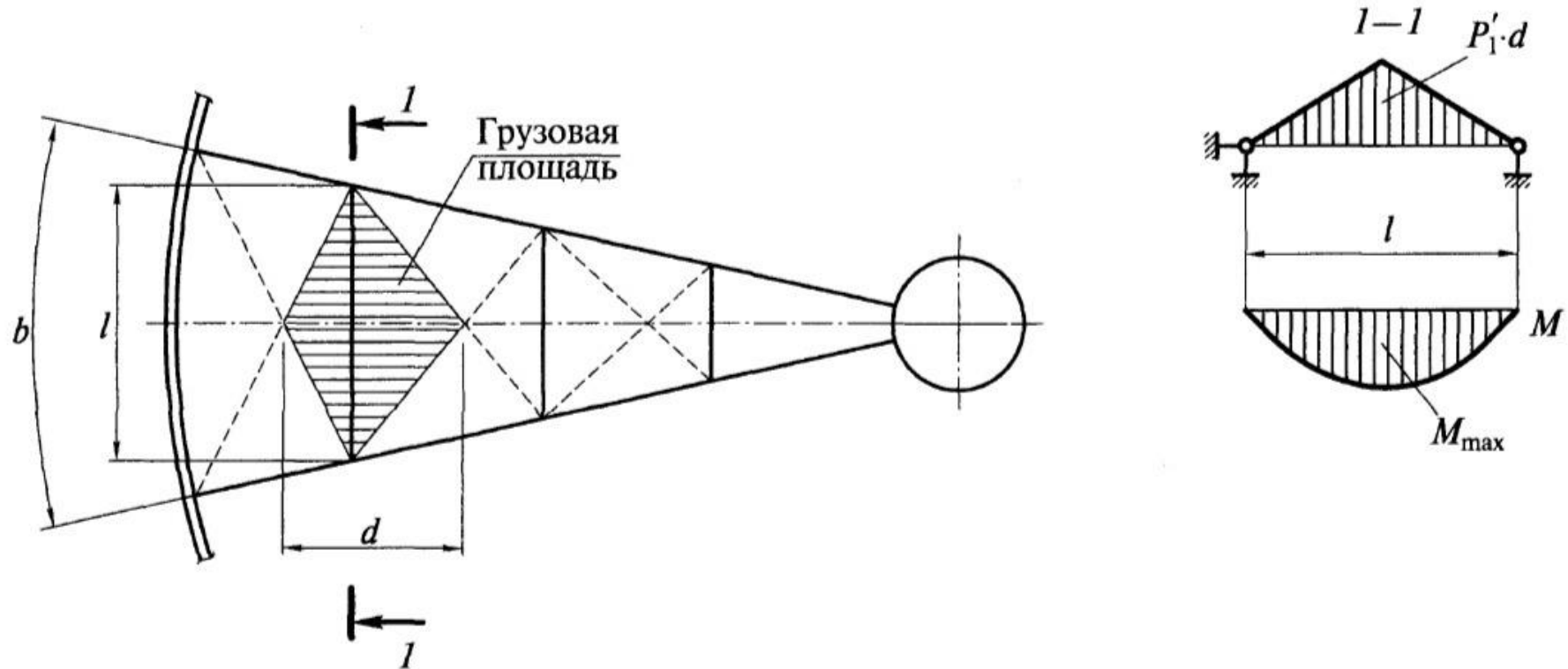
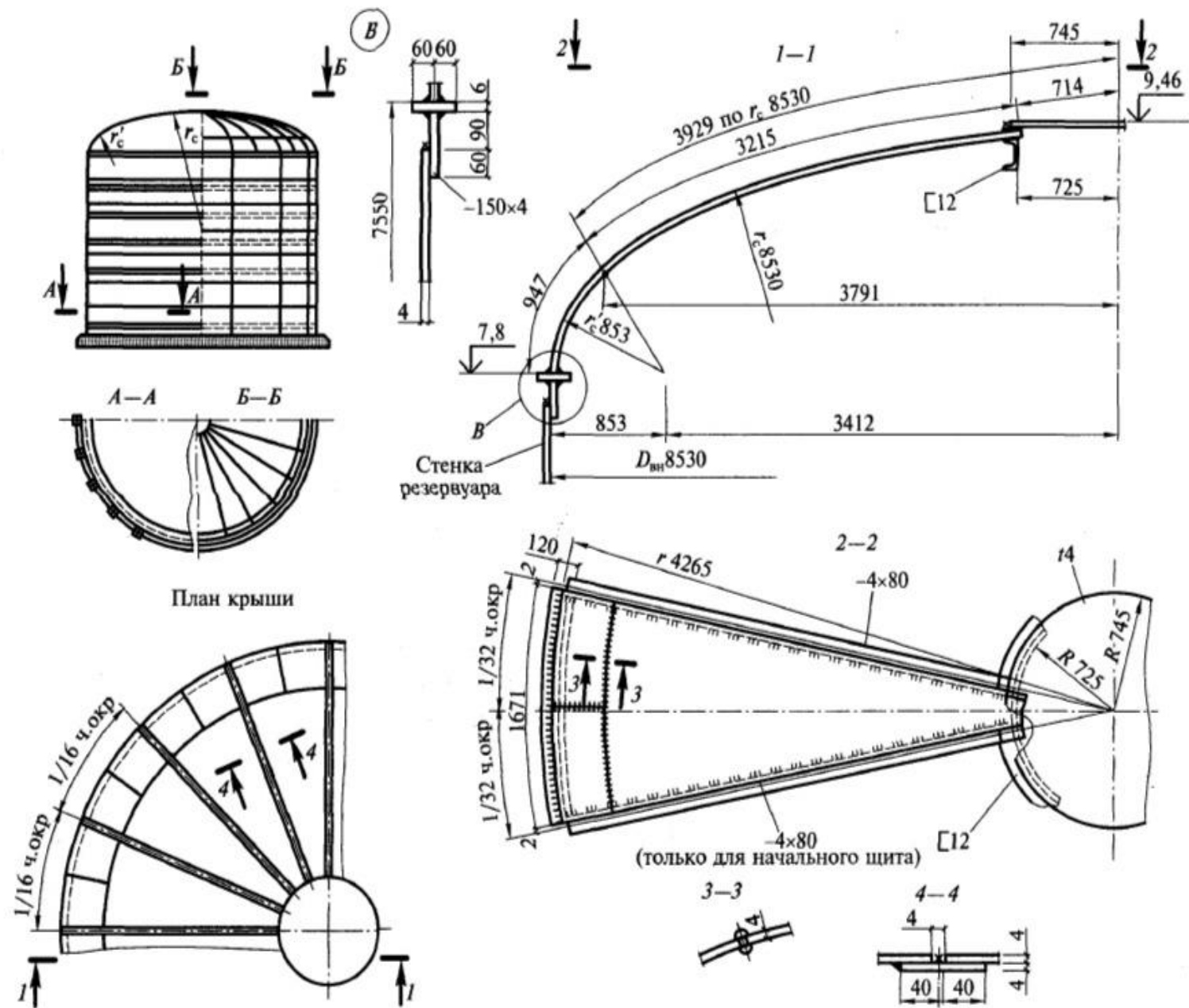
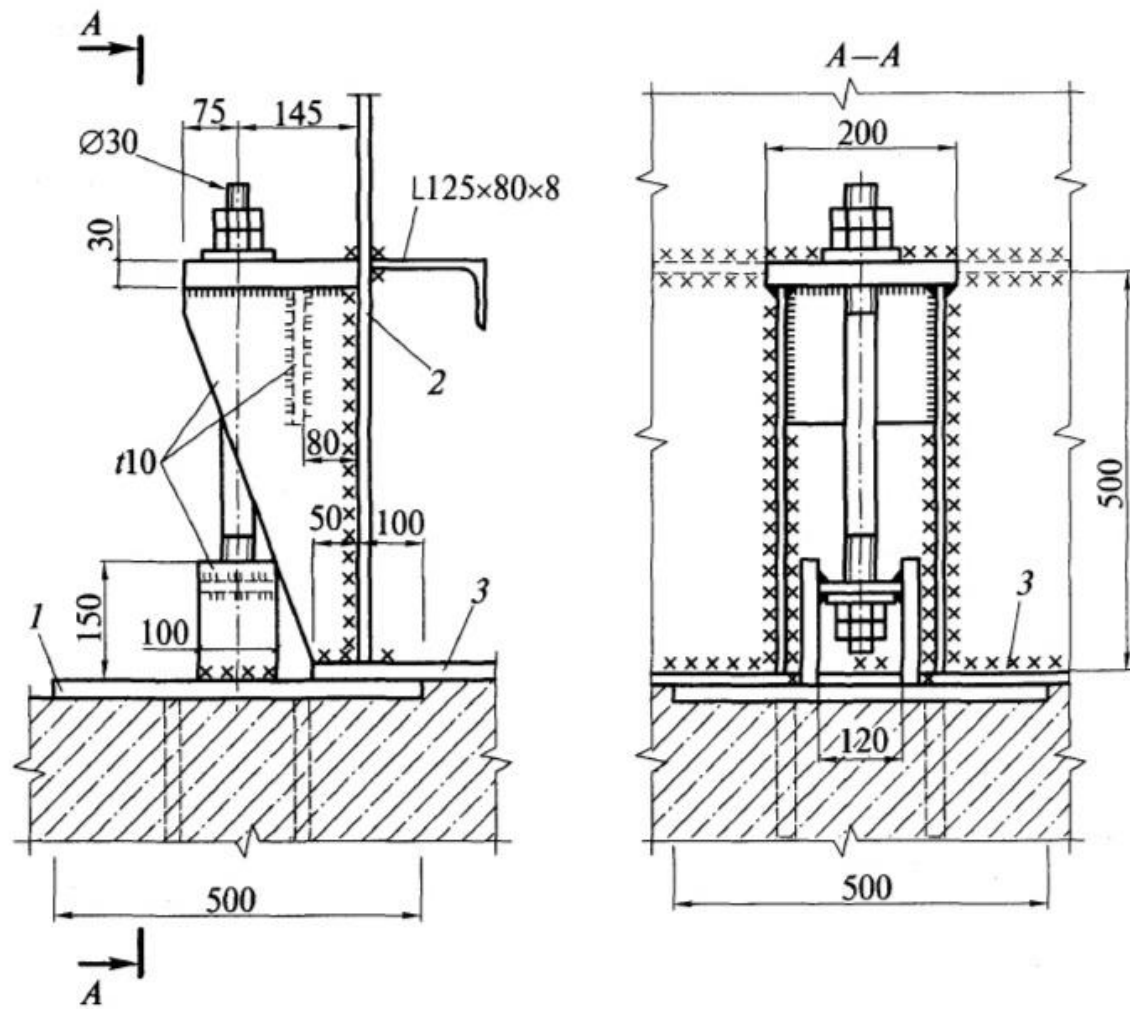


Рис. 23.17. Расчетная схема кольцевых ребер

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАРЫ
ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ



Вертикальный цилиндрический резервуар повышенного давления со сфероцилиндрической крышей



Усилия в анкерных болтах можно определить по формуле:

$$N_a = \frac{1,2P_{и}\pi r^2 - 0,9G}{n}$$

где $P_{и}$ - нормативное избыточное давление;

G - масса кровли, стенки и части дна шириной полосы 0,5-1,0 м;

0,9 - коэффициент недогрузки;

n - число болтов по периметру резервуара.

Анкерное крепление стенки резервуара повышенного давления к фундаменту:

1-закладная плита; 2-стенка; 3-днище.

**ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ
ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАР**

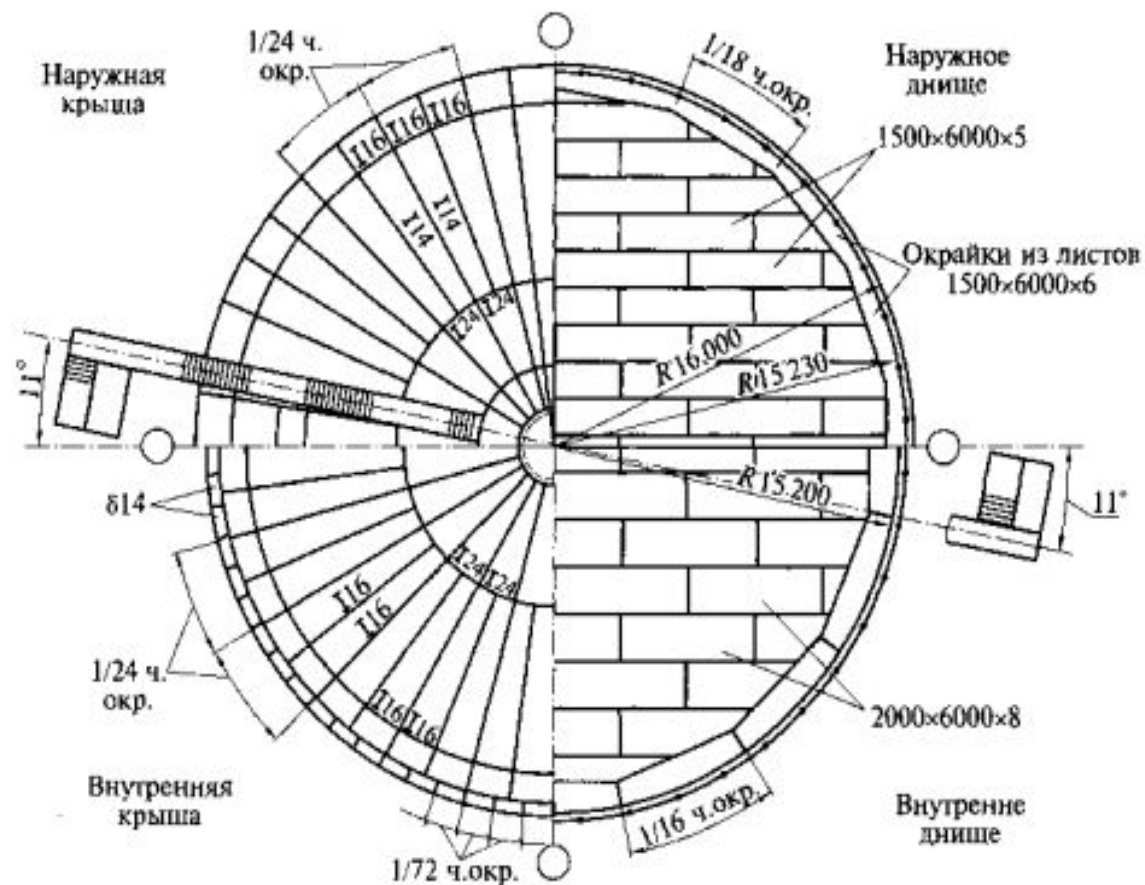
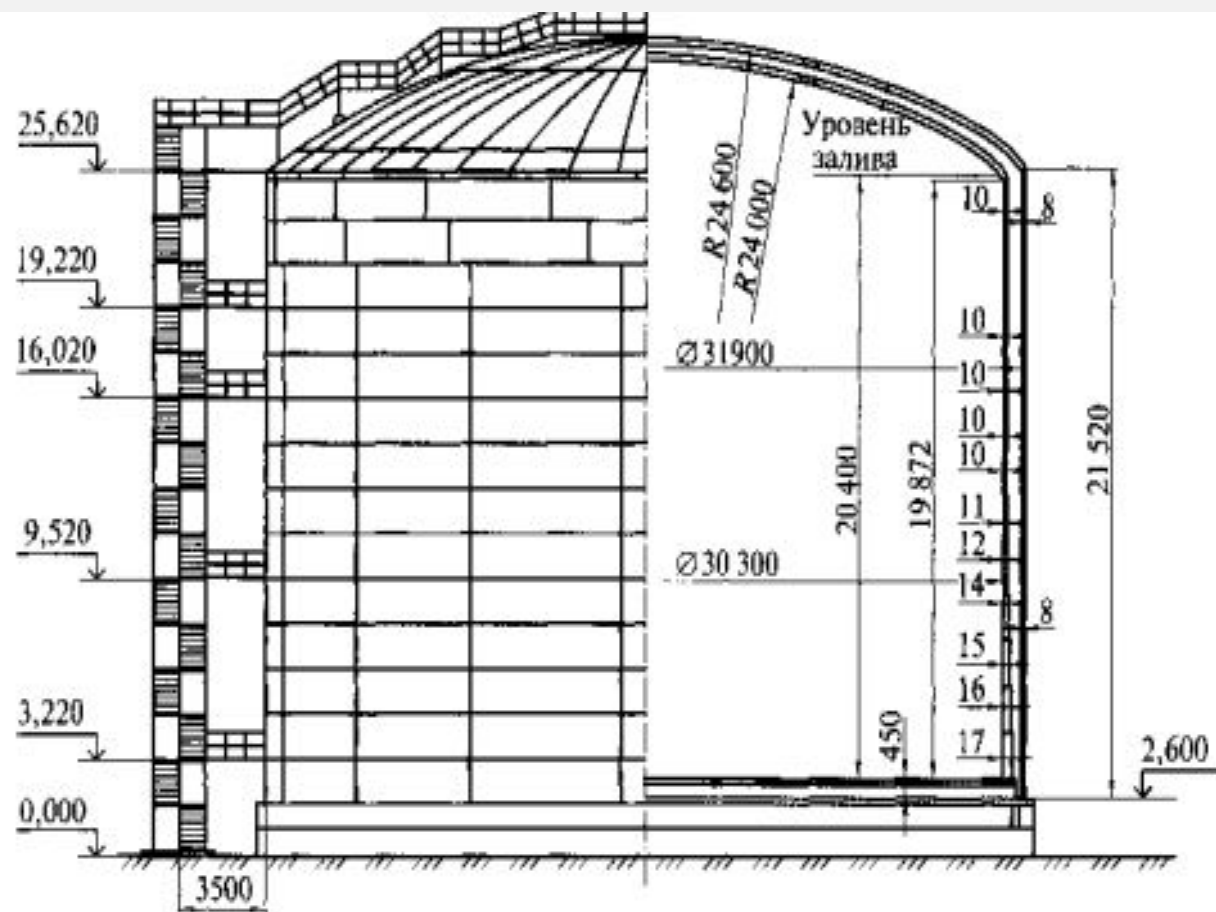


Рис. Изотермический резервуар объемом 15 000 м³ для хранения жидкого аммиака (-34°С)

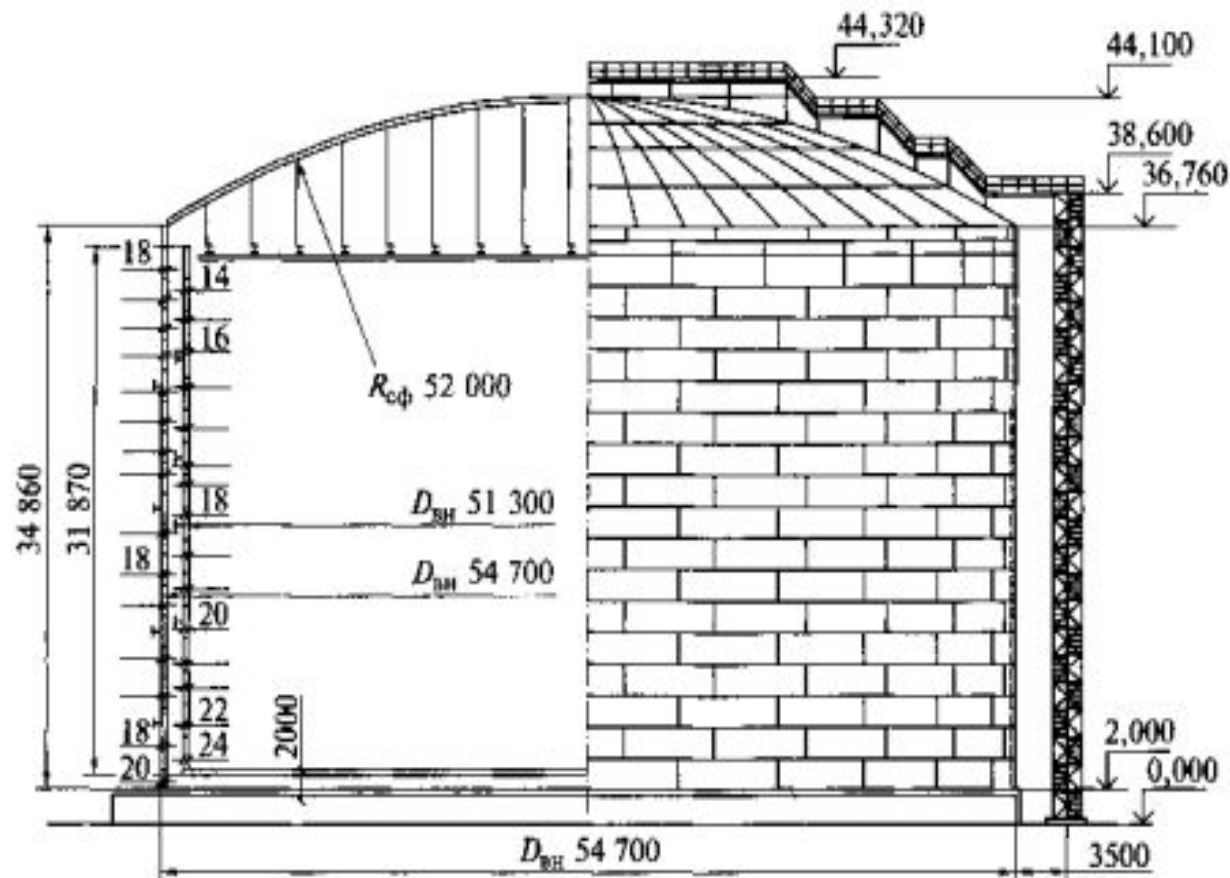
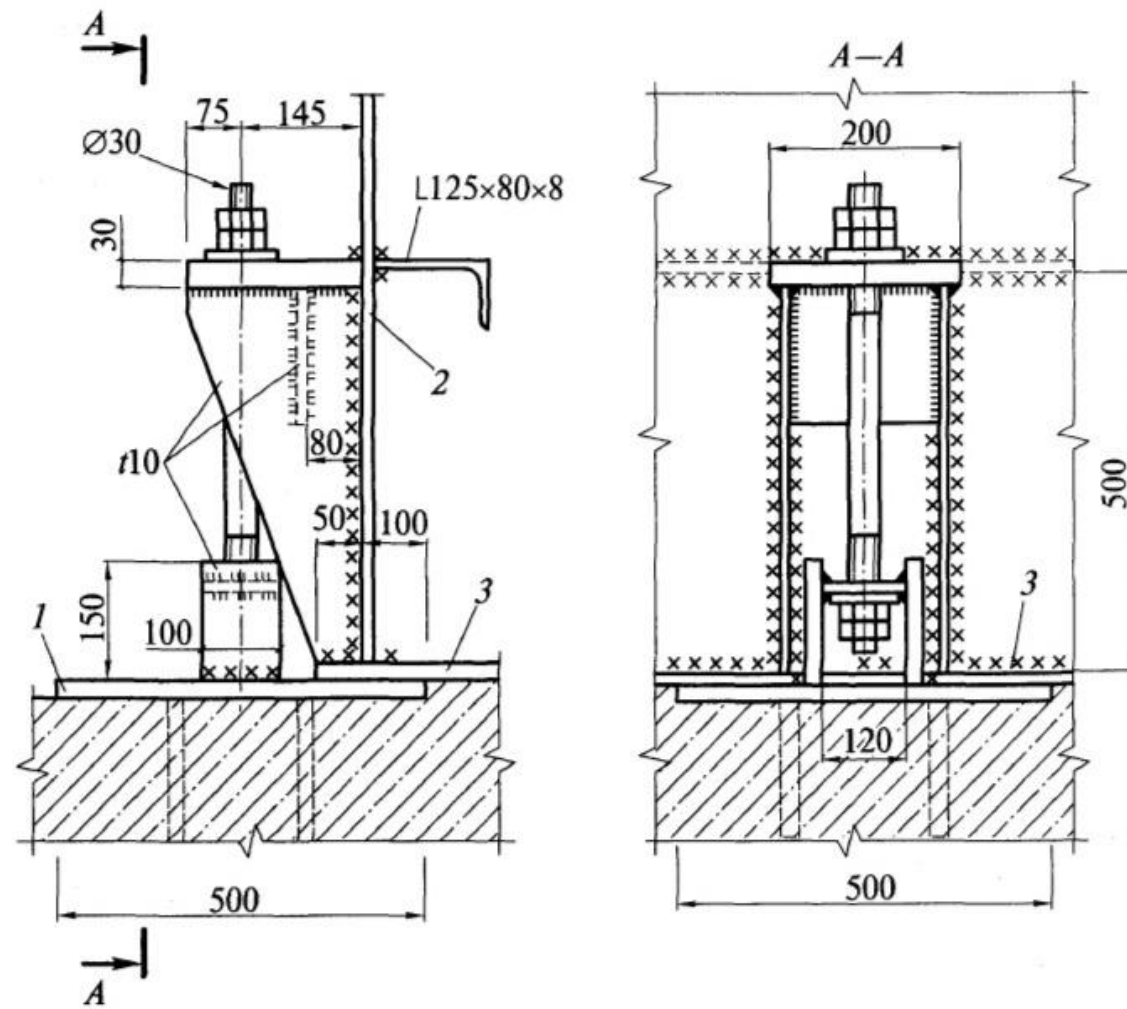


Рис. Изотермический резервуар объемом 60 000 м³ для хранения природного газа (-162°С)



Анкерное крепление стенки резервуара повышенного давления к фундаменту:

1-закладная плита; 2-стенка; 3-днище.

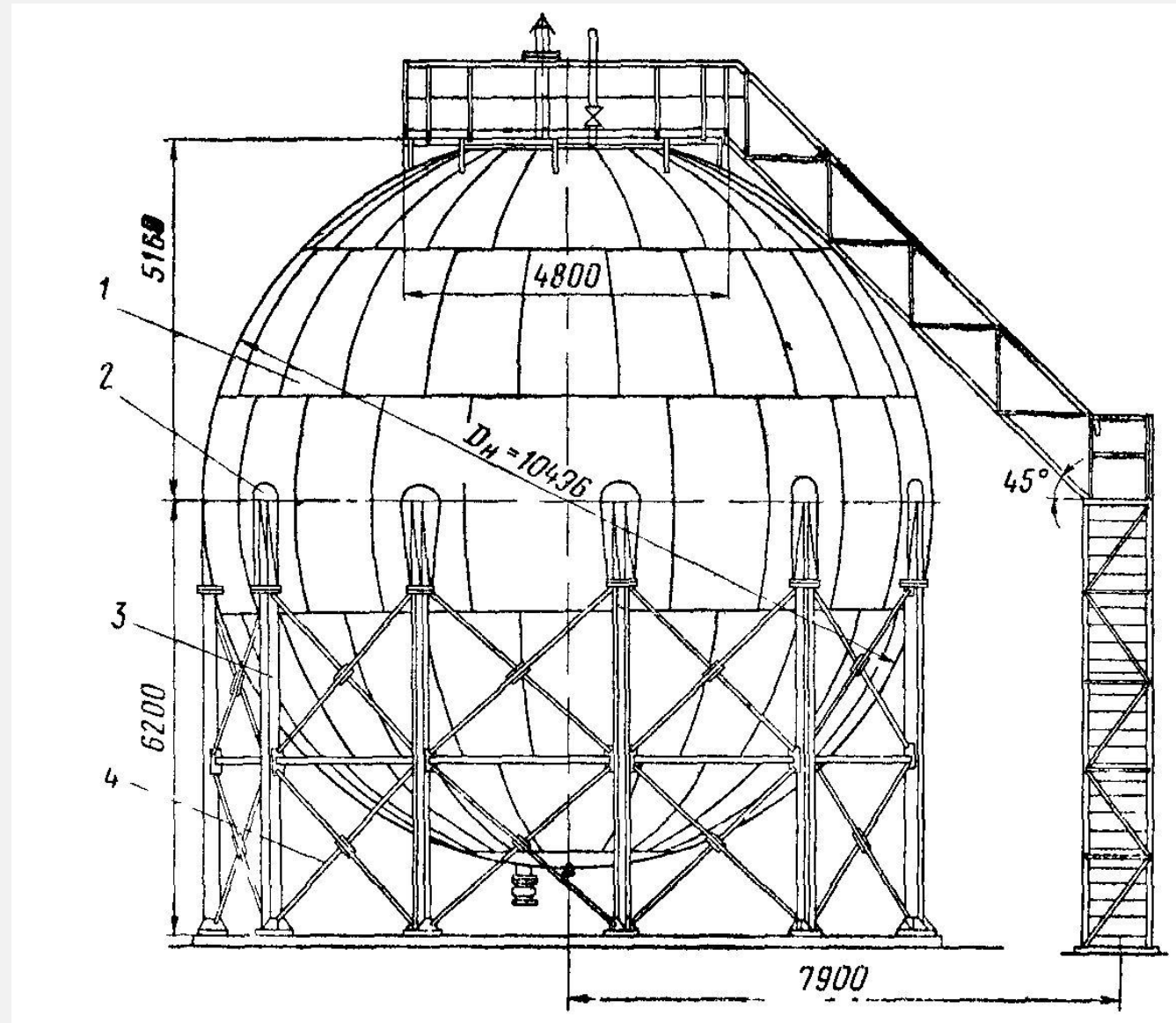
СФЕРИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАРЫ

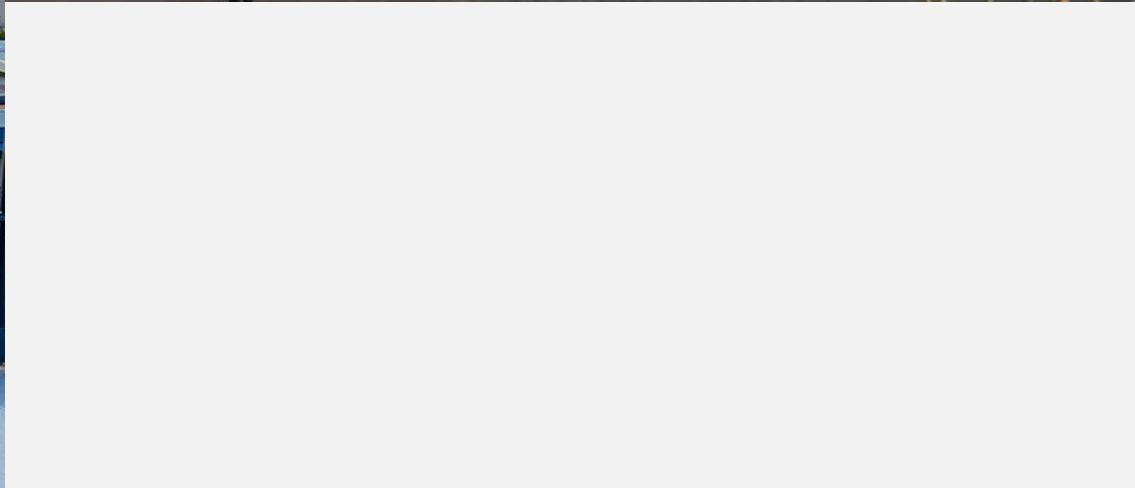
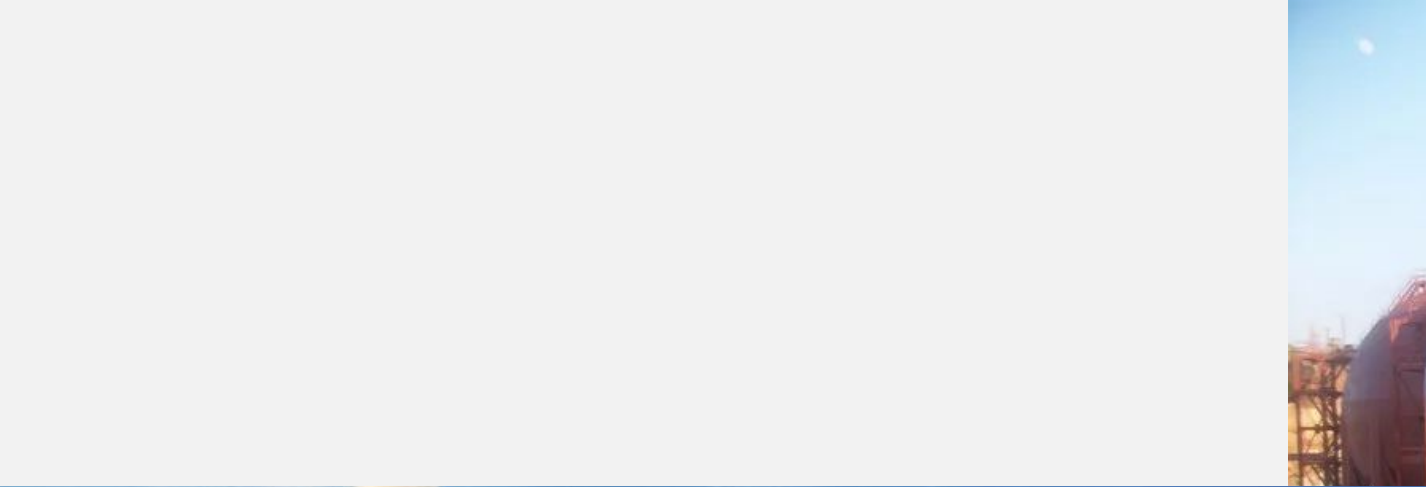
Конструктивные особенности.

Сферические резервуары используются для хранения жидкостей и сжиженных газов под высоким избыточным внутренним давлением от 250 до 1800 кПа.

Объем резервуаров обычно не превышает 4000 м³. Чаще всего используются резервуары объемов 600 и 2000 м³, имеющие диаметр соответственно 10,5 и 16 м.

Оболочки резервуаров изготавливают из сталей классов С345-440. Толщина их может достигать 36 мм.





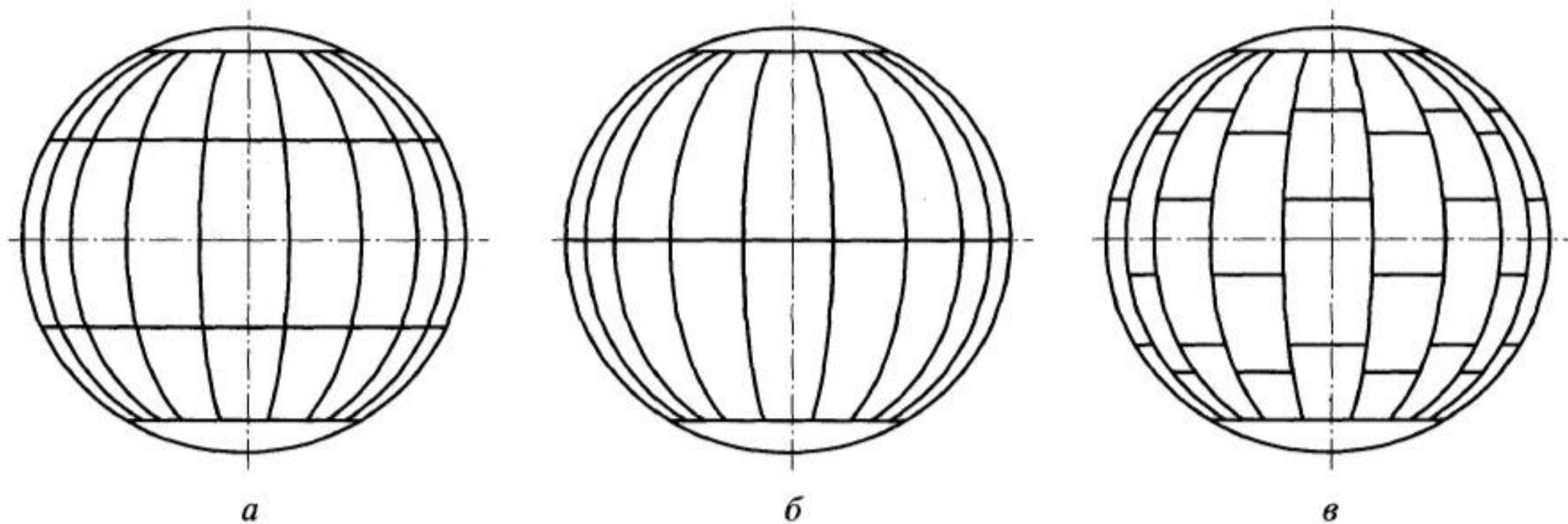


Рис. 23.26. Схемы раскроя оболочки:
a — параллельно-меридиональная (трехпоясная); *б* — экваториально-меридиональная (двухпоясная); *в* — меридиональная

Существует три основных способа монтажа.

1) Изготовление оболочки при вращении на манипуляторе с автоматической сваркой под флюсом.

2) Изготовление оболочки с периодическим поворотом при сборке и полуавтоматической сваркой горизонтальных швов на вертикальной плоскости.

3) Сборка и сварка оболочки в проектном положении.



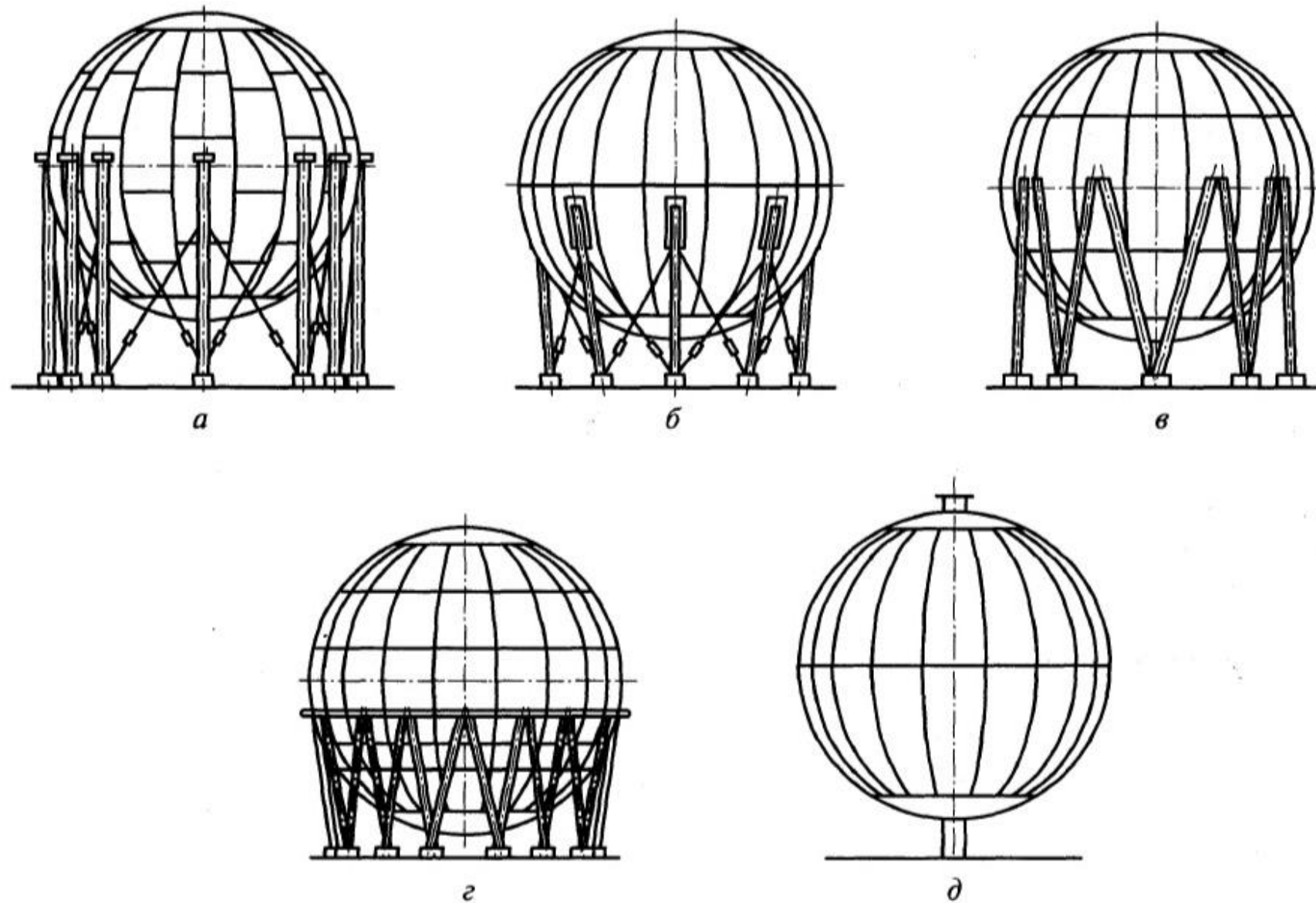


Рис. 23.28. Схемы опирания сферического резервуара:
a — с вертикальными стойками; *б* и *в* — с наклонными стойками; *г* — с опорным кольцом; *д* — на центральной опоре

СФЕРИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАРЫ: РАСЧЕТ

Минимальную расчетную толщину стенки в нижней точке корпуса определяют из условия прочности сварных стыковых швов по формуле:

$$t_{\min} = \frac{Pr}{2R_{wy}\gamma_c}$$

где P – давление на стенку от хранимой жидкости и избыточного давления;

R_{wy} – расчетное сопротивление сварных стыковых швов, при физическом контроле их качества

$$R_{wy} = R_y;$$

$\gamma_c = 0,6$ – коэффициент условий работы корпусов резервуаров высокого давления при расчете на прочность и устойчивость.

Устойчивость стенки сферической оболочки проверяется при действии вакуума в пустом резервуаре по формуле:

$$\sigma \leq \sigma_{cr}\gamma_c$$

где σ – действующее сжимающее напряжение от вакуума;

σ_{cr} – соответствующее критическое напряжение.