

А. А. Лапшин, А. И. Колесов, М. А. Агеева

**КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ
НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Учебное пособие

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

А. А. Лапшин, А. И. Колесов, М. А. Агеева

Конструирование и расчёт
вертикальных цилиндрических резервуаров
низкого давления

Учебное пособие

Нижний Новгород
ННГАСУ
2009

Рецензент: технический директор ООО «Промстальконструкция»
г. Н. Новгород, Глухов Александр Васильевич

Лапшин, А. А. Конструирование и расчёт вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления : учебное пособие / А. А. Лапшин, А. И. Колесов, М. А. Агеева; Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. – Н. Новгород, ННГАСУ, 2009. – 122 с.

Изложены основные вопросы расчёта и конструирования вертикальных стальных цилиндрических резервуаров. Пособие может быть использовано в качестве примера оформления при выполнении курсового проекта «Вертикальный цилиндрический резервуар низкого давления».

Предназначено для студентов специальности 270102.65 «Промышленное и гражданское строительство».

© Лапшин А. А., Колесов А. И., Агеева М. А., 2009

© ННГАСУ, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	3
1 Листовые конструкции. Общие сведения.....	5
1.1 Область применения, классификация и особенности листовых конструкций	5
1.2 Основные положения расчёта листовых конструкций.....	9
1.3 Вклад В. Г. Шухова в развитие резервуаростроения.....	16
1.4 Основные нормативные документы	18
1.5 Основные обозначения.....	19
2 Исходные данные на проектирование	20
2.1 Особенности разработки проектной документации	20
2.2 Исходные данные.....	23
3 Конструктивные решения стальных вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления	25
3.1 Конструкции основания и фундамента под резервуары	27
3.2 Днище резервуара.....	30
3.3 Цилиндрическая стенка резервуара.....	33
3.4 Стационарная кровля.....	38
3.5 Понтон и плавающая крыша	41
3.6 Лестницы, площадки, ограждения, переходы	42
3.7 Анкерное крепление стенки	45
3.8 Центральная стойка	45
4 Выбор материалов для элементов стенки, днища и крыши резервуара	46
5 Компоновка резервуаров	52

5.1	Определение оптимальных геометрических параметров для резервуаров с постоянной толщиной стенки	53
5.2	Определение оптимальных геометрических параметров для резервуаров с переменной толщиной стенки	57
5.3	Определение генеральных размеров резервуара.....	62
6	Расчёт конструкций резервуара.....	64
6.1	Расчёт стенки.....	65
6.2	Расчёт стационарной щитовой кровли	84
6.3	Расчёт стационарной сферической кровли (ребристо-кольцевой купол)	116
6.4	Расчёт анкерного крепления корпуса резервуара к основанию ...	117
6.5	Расчёт центральной стойки.....	118
	Библиографический список	119

1 ЛИСТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Область применения, классификация и особенности листовых конструкций

Листовыми конструкциями называют пространственные конструкции, в которых основную несущую и ограждающую функцию выполняют металлические листы, образующие оболочки различной формы. Классификация листовых конструкций может быть представлена в следующем виде:

Резервуары, предназначенные для хранения нефтепродуктов, масел, воды, сжиженных газов, кислот, спиртов и других жидкостей.

В зависимости от положения в пространстве и геометрической формы резервуары делят на вертикальные цилиндрические, горизонтальные цилиндрические, сферические, каплевидные, торовые, траншейные.

По расположению относительно планировочного уровня строительной площадки различают: надземные (на опорах), когда днище резервуара расположено на опорах выше уровня основания (грунта); наземные, когда днище резервуара опирается непосредственно на основание (грунт); полузаглубленные, когда нижняя грань (днище) или образующая расположены ниже планировочного уровня грунта; подземные резервуары, когда верхняя грань или верхняя образующая резервуара расположена ниже планировочного уровня площадки.

Вертикальные цилиндрические резервуары выполняют со стационарной крышей, с понтоном и плавающей крышей. Резервуары со стационарной крышей в зависимости от конструкции покрытия могут быть с конической крышей с центральной стойкой или без стойки; со сферической крышей в виде распорной конструкции; торосферической кровлей и кривизной в двух направлениях.

Газгольдеры, предназначенные для хранения, смешивания и выравнивания состава газов, для регулирования их расхода и давления. Их включают в газовую сеть между источником получения газа и его

потребителями в качестве аккумуляторов, выравнивающих производство и потребление газа.

В зависимости от применяемого давления газгольдеры могут быть разделены на 2 класса: газгольдеры высокого давления (>70 кПа); газгольдеры низкого давления (≤ 70 кПа). Газгольдеры высокого давления предназначены для эксплуатации при рабочем давлении от 70 кПа до 3 МПа, а иногда и при более высоком давлении. Рабочее давление в газгольдерах низкого давления назначают, исходя из специфики технологических процессов, но в большинстве случаев оно не превышает 4-5 кПа.

По своим технологическим особенностям и требованиям газгольдеры разделяют на два типа: переменного объёма (постоянного давления) и постоянного объёма (переменного давления). Газгольдеры переменного объёма предназначены для эксплуатации при низком избыточном давлении (не выше 0,005 МПа), а газгольдеры постоянного объёма – для хранения газа при более высоком избыточном давлении (нередко более 0,4 МПа).

Газгольдеры постоянного объёма имеют цилиндрическую или сферическую геометрическую форму.

Цилиндрические газгольдеры могут быть как вертикальные, так и горизонтальные и иметь различную форму днищ: сферическую, эллиптическую и торовую. Объёмы их колеблются от 100 до 200 м³ при внутреннем давлении от 0,4 до 1,8 МПа.

Объёмы сферических газгольдеров составляют 600-1000 м³. Они более экономичны по массе, расход металла на их изготовление на 40% меньше, чем на цилиндрические.

Бункера и силосы, предназначенные для хранения и перегрузки сыпучих материалов: руды, угля, кокса, флюсов, цемента, песка, гравия, щебня и др. Группы бункеров обычно объединяются в бункерные эстакады. Силосы отличаются от бункеров сравнительно большим отношением высоты к размерам в плане.

Стальные бункера отличаются многообразием объёмно-планировочных и конструктивных решений. Среди основных конструктивных решений наиболее широкое применение нашли бункера с плоскими стенками и гибкие бункера.

Трубопроводы большого диаметра ($D > 0,5$ м), используемые для транспортирования нефтепродуктов, газа, воды, размельчённых или разжиженных твёрдых веществ.

Протяжённые трубопроводы большого диаметра называют магистральными трубопроводами. Область их применения велика: магистральные газопроводы; нефтепроводы; углепроводы; напорные трубопроводы гидравлических электростанций и циркуляционные трубопроводы ТЭС и АЭС; заводские газопроводы и воздухопроводы металлургических заводов, нефтехимических заводов; подводные трубопроводы (дюкеры). Они являются исключительно металлоёмкими и дорогостоящими сооружениями.

По месту укладки и типу опирания трубопроводы могут быть надземными, лежащими на отдельных опорах; подземными, уложенными в грунт (в траншеях, канавах насыпях) или на опоры в тоннелях; подводными, уложенными по дну водоёмов и рек или в траншеях, прорытых на дне.

Магистральные нефтепроводы и нефтепродуктопроводы в зависимости от диаметра подразделяют на 4 класса: 1 класс – при диаметре более 1000 мм; 2 класс – $500 < D < 1000$ мм; 3 класс – $300 < D < 500$ мм; 4 класс – $D \leq 300$ мм.

В зависимости от внутреннего давления трубопроводы делят на напорные и безнапорные. Напорные трубопроводы могут быть высокого, среднего и низкого давления (в пределах от 0,7 до 10 МПа).

Специальные листовые конструкции – сооружения металлургической, химической, нефтяной и других отраслей промышленности: кожухи доменных печей, воздухонагревателей, пылеуловителей; сосуды химической и нефтезаводской аппаратуры, защитные оболочки реакторов АЭС, дымовые и вентиляционные трубы, сплошностенчатые башни, градирни и т.п.

По характеру работы листовые конструкции разделяют на: наливные и работающие под внутренним давлением или вакуумом; находящиеся под действием высокой, нормальной и низкой температуры; работающие на статическую, знакопеременную и ударную нагрузки; работающие в условиях нейтральных или агрессивных сред.

В большинстве случаев листовые конструкции представляют собой ёмкостные сооружения в виде тонкостенных сплошных оболочек.

Условия работы листовых конструкций весьма разнообразны: они могут быть надземными, наземными, полузаглубленными, подземными, подводными; могут воспринимать статические и динамические нагрузки; работать под низким, средним и высоким давлением, под вакуумом, под воздействием низких, средних и высоких температур, нейтральных или агрессивных сред и т. д.

Для листовых конструкций характерно двухосное напряжённое состояние, а в местах сопряжения различных оболочек или на участках заземления оболочек у колец жёсткости, крыш и днищ дополнительно возникают местные напряжения, быстро затухающие по мере удаления от этих участков (явление краевого эффекта). Причина возникновения местных напряжений краевого эффекта заключается в том, что под действием расчётных нагрузок общие точки сопряжённых между собой разных оболочек или оболочек и конструктивных элементов из условия совместности деформаций имеют одинаковые перемещения, хотя каждая из них под действием этих нагрузок стремится к разным деформациям, соответствующим их геометрическим и статическим параметрам.

Основной особенностью листовых конструкций является необходимость обеспечить не только равнопрочные, но и герметичные (плотные) сопряжения листов. При этом протяжённость сварных соединений существенно больше, чем в других типах сварных соединений. Так, например, в сварных листовых конструкциях малой и средней толщины на 1 т стали приходится 30-50 м

сварных швов против 15-25 м в обычных строительных металлических конструкциях.

При изготовлении листовых конструкций необходимы операции, не встречающиеся при изготовлении обычных металлических конструкций: фасонный раскрой листового проката; вальцовка цилиндрических, конических оболочек и колец; вальцовка и штамповка оболочек двойкой кривизны; отбортовка и строжка кромок выпуклых днищ и другие операции.

1.2 Основные положения расчёта листовых конструкций

Большинство листовых конструкций являются тонкостенными оболочками вращения. Оболочкой называют тело, ограниченное двумя поверхностями, расстояние между которыми (толщина) мало по сравнению с другими её размерами. Поверхность, делящую толщину оболочки пополам, называют срединной поверхностью. Большинство оболочек имеет постоянную толщину, поэтому их геометрия определяется формой срединной поверхности.

Поверхности оболочек имеют одну или две (для сферических оболочек) оси симметрии и два радиуса кривизны, перпендикулярные срединной поверхности: r_1 – меридиональный радиус, образующий кривую вращения; r_2 – кольцевой радиус вращения с началом на оси симметрии. Величины, обратные радиусам называют кривизнами оболочки.

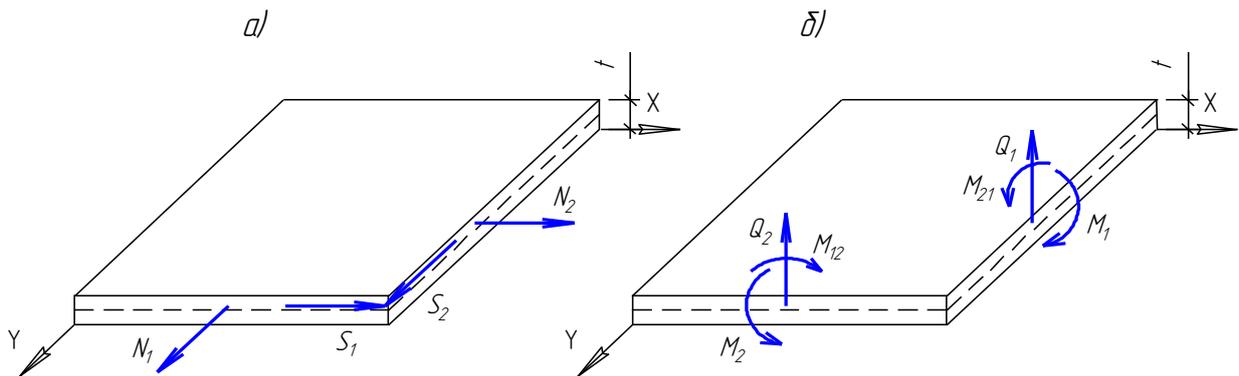
$$k_1 = \frac{1}{r_1} \text{ и } k_2 = \frac{1}{r_2}. \quad (1.1)$$

На срединной поверхности оболочки всегда можно найти две взаимно перпендикулярные линии, кривизны которых обладают свойствами экстремальности: одна из них максимальная, а другая – минимальная. Кривизны, обладающие свойствами экстремальности, называют главными кривизнами. Произведение двух главных кривизн в точках срединной

поверхности $\Gamma = k_1 \cdot k_2$ называют гауссовой кривизной, которая и характеризует геометрию поверхности оболочки.

Различают оболочки: положительной гауссовой кривизны (сферические и эллиптические); нулевой гауссовой кривизны (цилиндрические и конические); отрицательной гауссовой кривизны (гиперболические); смешанной кривизны, т. е. оболочки, состоящие из участков различной гауссовой кривизны (торообразные).

Под действием произвольной внешней нагрузки в оболочках возникают две группы усилий: 1) безмоментные нормальные N_1 и N_2 и сдвигающие S_1 и S_2 усилия, действующие в плоскостях, касательных к срединной поверхности оболочки (рис. 1.1, а); 2) изгибающие моменты M_1 и M_2 , крутящие моменты M_{12} и M_{21} и поперечные силы Q_1 и Q_2 (рис. 1.1, б).



а) безмоментное напряжённое состояние; б) моментное напряжённое состояние

Рис. 1.1 – Усилия в элементе оболочки

Под действием внешней нагрузки в толстостенной оболочке ($t/r > 1/20$) возникают внутренние усилия моментного напряжённого состояния. При малой толщине ($1/20 \geq t/r \geq 1/500 \dots 1/1000$) оболочки являются тонкостенными и в них возникают усилия безмоментного напряжённого состояния (рис. 1.1, а) при условии, что тонкостенная оболочка имеет плавно изменяющуюся непрерывную поверхность, а нагрузка приложена плавно и непрерывно. При этом края оболочки должны иметь возможность свободно перемещаться в

направлении нормали к поверхности; силы, приложенные к краям оболочки, должны лежать в плоскости, касательной к её срединной поверхности. В зависимости от вида напряжённого состояния различают безмоментную и моментную теории оболочек.

Применительно к листовым конструкциям большинство оболочек являются тонкостенными. В соответствии с гипотезами Киргофа-Лява современными теориями расчёта тонкостенных оболочек принято, что основное напряжённое состояние оболочки на участках, удалённых от её краёв, можно считать безмоментным. Расчёт таких оболочек может быть выполнен по уравнению Лапласа.

Для вывода уравнения Лапласа рассмотрим оболочку, образованную вращением вокруг оси Z линии, описываемой уравнением $r_1 = r_2(Z)$. В силу осевой симметрии, на бесконечно малый элемент $dS_1 dS_2$, выделенный двумя меридиональными и двумя горизонтальными (радиальными) плоскостями будут действовать только продольные усилия N_1 и N_2 .

Для определения равновесного состояния этого элемента спроектируем все силы, действующие на него, на направление нормали n :

$$PdS_1 dS_2 - N_1 dS_2 \frac{d\varphi}{2} - \left(N_1 + \frac{\partial N_1}{\partial S_1} dS_1 \right) dS_2 \frac{d\varphi}{2} - N_2 dS_1 \frac{d\alpha}{2} - \left(N_2 + \frac{\partial N_2}{\partial S_2} dS_2 \right) dS_1 \frac{d\alpha}{2} = 0, \quad (1.2)$$

где $d\varphi = dS_1 / r_1$; $d\alpha = dS_2 / r_2$.

Усилия N_1 и N_2 являются равнодействующими нормальных напряжений, приложенных к сторонам элемента $dS_1 dS_2$:

$$\begin{aligned} N_1 &= \sigma_1 dS_2 t, \\ N_2 &= \sigma_2 dS_1 t. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Подставляя (1.3) в (1.2) и произведя упрощения, получим искомое уравнение Лапласа

$$\frac{\sigma_1}{r_1} + \frac{\sigma_2}{r_2} = \frac{P}{t}. \quad (1.4)$$

В этом уравнении два неизвестных параметра – напряжения σ_1 и σ_2 , поэтому необходимо иметь второе дополнительное уравнение равновесия, для получения которого сделаем горизонтальный разрез оболочки плоскостью, перпендикулярной оси симметрии (Z), и рассмотрим равновесное состояние отсечённой части оболочки. Спроектируем все силы, приложенные к отсечённой части оболочки, на ось симметрии Z :

$$P \cdot \pi \cdot r_2^2 \sin^2 \varphi - N_1 \cdot 2\pi \cdot r_2 \sin^2 \varphi = 0, \quad (1.5)$$

откуда $N_1 = Pr_2/2$, или

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{t} = \frac{Pr_2}{2t}. \quad (1.6)$$

Подставляя (1.6) в (1.4) получим уравнение

$$\sigma_2 = \sigma_1 \left(2 - \frac{r_2}{r_1} \right). \quad (1.7)$$

Решение уравнений (1.4) и (1.6) относится к статической задаче безмоментной теории оболочек вращения при осесимметричной нагрузке и позволяет определить напряжения в любой зоне оболочки вдали от участков закрепления, сопряжений с другими конструктивными элементами и мест резкого изменения геометрической формы оболочки.

В частном случае для цилиндрической оболочки $r_1 = \infty$ получим значения кольцевых напряжений по формуле:

$$\sigma_2 = \frac{P \cdot r_2}{t}, \quad (1.8)$$

для меридиональных напряжений:

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot r_2}{2t}. \quad (1.9)$$

Для сферической оболочки кольцевой и меридиональный радиусы кривизны равны $r_1 = r_2 = r$ и напряжённое состояние в каждой точке во всех направлениях одинаково:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = Pr/2t. \quad (1.10)$$

Для конических оболочек $r_1 = \infty$, тогда меридиональные и кольцевые напряжения в любом сечении i определяются по формулам:

$$\sigma_1^i = \frac{Pr_2^i}{2t \cos \beta}; \quad \sigma_2^i = \frac{Pr_2^i}{t \cos \beta}, \quad (1.11)$$

где β – угол между образующей конуса и его осью.

Расчёт на прочность листовых конструкций в виде оболочек вращения, находящихся в безмоментном напряжённом состоянии, выполняют по формуле:

$$\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 + 3\tau_s^2} \leq R_y \gamma_c, \quad (1.12)$$

где σ_1 , σ_2 – нормальные напряжения по двум взаимно перпендикулярным направлениям; τ_s – касательные напряжения. При этом необходимым является выполнение следующих условий:

$$\sigma_1 \leq R_y \gamma_c, \quad \sigma_2 \leq R_y \gamma_c. \quad (1.13)$$

Расчёт на устойчивость несущих элементов листовых конструкций выполняют с учётом особенностей их конструктивных форм, а также нагрузок и воздействий.

Для конструкций в виде цилиндрических оболочек вращения, равномерно сжатых в направлении образующих сил N , искривление оболочки при потере устойчивости стенки происходит преимущественно в меридиональном направлении, при этом проверку устойчивости выполняют по формуле:

$$\sigma_1 \leq \sigma_{cr1} \gamma_c, \quad (1.14)$$

где $\sigma_1 = Nr_2/2t$ – расчётное меридиональное напряжение в стенке оболочки; σ_{cr1} – критическое напряжение, равное меньшему из значений

$$\sigma_{cr1} = \psi R_y \text{ и } \sigma_{cr1} = \frac{cEt}{r_2}. \quad (1.15)$$

Значение коэффициента ψ при $0 < r_2/t \leq 350$ следует определять по формуле

$$\psi = 0,97 - (0,00025 + 0,95R_y/E)r_2/t. \quad (1.16)$$

Значения коэффициента c принимаются по таблице 1.1 в зависимости от отношения r_2/t .

Таблица 1.1 – Значения коэффициентов c

r_2/t	100	200	300	400	600	800	1000	1500	2500
c	0,22	0,18	0,16	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06

Расчёт на устойчивость цилиндрических оболочек вращения при действии внешнего или внутреннего равномерного давления P в направлении нормали к поверхности стенки следует выполнять по формуле

$$\sigma_2 \leq \sigma_{cr2} \gamma_c, \quad (1.17)$$

где $\sigma_1 = Pr_2/t$ – расчётное кольцевое напряжение в стенке оболочки;
 σ_{cr2} – критическое кольцевое напряжение, определяемое по формулам:

$$\text{при } 0,5 \leq l/r_2 \leq 10 \quad \sigma_{cr2} = 0,55E(r_2/l)(t/r_2)^{3/2};$$

$$\text{при } l/r_2 \geq 20 \quad \sigma_{cr2} = 0,17E(t/r_2)^2,$$

где l – длина цилиндрической оболочки. При $10 < l/r_2 < 20$ напряжение σ_{cr2} следует определять линейной интерполяцией.

Расчёт на устойчивость цилиндрической оболочки вращения, подверженной одновременному действию сжимающих нагрузок, равномерно распределённых вдоль образующих, и внешнего равномерного давления P , следует выполнять по формуле:

$$\sigma_1/\sigma_{cr1} + \sigma_2/\sigma_{cr2} \leq \gamma_c. \quad (1.18)$$

Расчёт на устойчивость сферической оболочки при $r/t \leq 750$ и действии внешнего равномерного давления P , нормального к боковой поверхности, выполняется по формуле:

$$\sigma \leq \sigma_{cr} \gamma_c, \quad (1.19)$$

где $\sigma = Pr/2t$ – расчётное напряжение в оболочке; $\sigma_{cr} = 0,1Et/r$ – критическое напряжение, принимаемое не более R_y .

Расчёт на устойчивость конической оболочки вращения, подверженной одновременному действию нагрузки N вдоль её оси и внешнего равномерного давления P , нормального к боковой поверхности, выполняется по формуле:

$$N/N_{cr} + \sigma_2/\sigma_{cr2} \leq \gamma_c; \quad (1.20)$$

$$N_{cr} = 2 \cdot \pi \cdot r_m \cdot t \cdot \sigma_{cr1} \cdot \cos^2 \beta, \quad (1.21)$$

где $N \leq N_{cr} \gamma_c$;

$$r_m = \frac{0,9r_2^{\text{осн}} + 0,1r_2^{\text{верш}}}{\cos\beta};$$

$\sigma_2 = Pr_m/t$ – расчётное кольцевое напряжение в оболочке;

$\sigma_{cr2} = 0,55E(r_m/h)(t/r_m)^{3/2}$ – критическое кольцевое напряжение в оболочке;

h – высота конической оболочки.

Листовые конструкции таких сооружений, как дымовые трубы и вентиляционные трубы, мачты, градирни и др., проверяемые на резонанс от действия ветра, а также бункера, воспринимающие вибрационные нагрузки, следует проверять расчётом на выносливость.

В местах оболочек, где свободные деформации стенок затруднены, проявляется краевой эффект, характеризуемый наличием местных напряжений. Возникающие при этом изгибающие моменты M_k распространяются по некоторой части длины оболочки и имеют волнообразный, резко затухающий характер. Так, в цилиндрических оболочках изгибающий момент первой волны достигает нулевого значения на расстоянии $\pi S_M / 4$ от краевой линии. Параметр S_M можно определить по формуле:

$$S_M = 0,78\sqrt{tr_2}. \quad (1.22)$$

1.3 Вклад В. Г. Шухова в развитие резервуаростроения

Большой вклад в развитие резервуаростроения внёс выдающийся российский инженер-исследователь Владимир Григорьевич Шухов (1853-1939).

В. Г. Шухов впервые в мире в 1878 г. применил для хранения нефти и нефтепродуктов стальные клёпаные вертикальные цилиндрические резервуары, имеющие плоское днище и коническую крышу. Он разработал теорию проектирования резервуаров минимального веса и установил оптимальное

соотношение между их диаметром и высотой. В резервуарах большой ёмкости В. Г. Шухов предложил изменять толщину стали корпуса по высоте, что обеспечивало существенную экономию металла.

В XX веке в резервуарах вместо заклёпок стали применять сварку, что позволило существенно упростить конструктивные решения и создать новые конструктивные формы и методы изготовления и монтажа резервуаров.

Большое значение для дальнейшего развития резервуаростроения имели работы по автоматизации сварки, выполненные Киевским институтом электросварки имени Е. О. Патона.

Масштабы применения стальных резервуаров во всём мире очень велики. Монтаж их ведётся в основном полистовым способом. В нашей стране в середине XX века был разработан и внедрён новый высокопроизводительный метод возведения сварных вертикальных цилиндрических резервуаров (ВЦРС) из полотнищ заводского изготовления, сворачиваемых и доставляемых на монтажную площадку в габаритных рулонах.

Этот метод получил название «метод рулонирования». При этом методе значительная часть сварочно-монтажных работ и изготовление укрупнённых блоков переносится в заводские условия. При этом повышается качество работ, улучшаются условия труда, уменьшается отрицательное влияние сезонности работ и других факторов. Метод рулонирования в настоящее время применяется для резервуаров с толщиной стенки до 18 мм.

Работы по оптимизации параметров стальных резервуаров, выполненные в ЦНИИПСК показали, что формулы В. Г. Шухова позволяют получить оптимальные по расходу стали резервуары объёмом до 5 тыс. м³ включительно, изготовленные из одной марки стали. Для резервуаров большего диаметра поиск оптимальных параметров следует производить вариацией числа поясов и сопоставлением при этом удельных расходов стали или стоимости.

1.4 Основные нормативные документы

Основным нормативным документом, регламентирующим вопросы проектирования и расчёта стальных вертикальных цилиндрических резервуаров в нашей стране, являются ПБ 03-605-03 «Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [1]. При проектировании данный документ предполагается рассматривать совместно со СНиП II-23-81* Стальные конструкции [2], Пособием по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*) [3], СП 53-102-2004 Общие правила проектирования стальных конструкций [4], СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия [5], а также с другой справочной литературой, в частности, справочником проектировщика [6].

1.5 Основные обозначения

V – номинальный объём;

D – диаметр;

ρ – плотность продукта;

$r_{\text{вн}}$ – внутренний радиус;

r – радиус срединной поверхности пояса стенки;

$H_{\text{ст}}$ – полная высота стенки;

H – высота налива продукта;

t – номинальная толщина пояса стенки;

t_p – расчётная толщина пояса;

$t_{\text{дн ц}}$ – толщина листов центральной части днища;

$t_{\text{дн окр}}$ – толщина листов окрайки днища;

σ_1 – меридиональные напряжения;

σ_2 – кольцевые напряжения;

R_y – расчётное сопротивление материала;

γ_c – коэффициент условий работы;

γ_n – коэффициент надёжности по назначению;

γ_f – коэффициент надёжности по нагрузке;

g – ускорение свободного падения в районе строительства;

$P_{\text{и}}$ – значение избыточного давления;

$P_{\text{вак}}$ – величина относительного разрежения (вакуум);

$P_{\text{вет}}$ – значение ветрового давления на уровне верха стенки.

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

2.1 Особенности разработки проектной документации

Как уже было отмечено ранее, резервуарами называются сосуды, предназначенные для приёма, хранения, технологической обработки и отпуска нефти, нефтепродуктов, сжиженных газов, воды, жидкого аммиака, технического спирта и других жидкостей.

Наибольшее удельное значение в числе хранимых жидкостей имеют нефть и продукты её переработки. Во время их хранения происходит испарение и потеря наиболее летучих, самых ценных компонентов. Кроме прямых убытков это явление оказывает вредное воздействие на окружающую среду. Потеря нефтепродуктов происходит главным образом вследствие больших и малых дыханий резервуаров.

Малые дыхания возникают вследствие колебаний температуры нефтепродуктов и газовой смеси над их поверхностью, а также колебаний атмосферного давления. Когда давление в газовой подушке становится ниже атмосферного, в резервуаре образуется вакуум, что может привести к потере устойчивости корпуса. Чтобы этого избежать предусматривают дыхательный клапан, через который атмосферный воздух попадает в резервуар. При повышении температуры увеличивается внутреннее давление и вместе с ним – опасность разрушения резервуара. Для защиты резервуара от разрушения предусматривают предохранительный клапан, через который газоздушная смесь, наполненная парами хранимого продукта, выбрасывается в атмосферу. Чем ниже давление, при котором срабатывает клапан, тем больше потери хранимого продукта, но дешевле стоимость резервуара вследствие простоты его конструкции и малой толщины корпуса. Годовые потери от малых дыханий составляют в среднем 0,5-1% хранимого продукта.

Большие дыхания происходят при опорожнении и наполнении резервуара. При опорожнении в резервуар засасывается атмосферный воздух,

при наполнении воздух вместе с парами продукта выбрасывается в атмосферу. В среднем потери при заполнении резервуара бензином составляют в зимнее время $0,35 \text{ кг/м}^3$ ёмкости, в летнее время – $0,55 \text{ кг/м}^3$ за один цикл. Определяющее влияние на потери при больших дыханиях имеет число циклов наполнения – опорожнения в год (оборачиваемость резервуара). Это число зависит от назначения нефтехранилищ и колеблется от 12 до 96 циклов в год.

Потери нефтепродуктов можно существенно снизить или даже совсем ликвидировать, увеличив расчётное избыточное давление в резервуаре или ликвидировав газовую подушку, отделив воздушное пространство от жидкости путём устройства плавающей крыши и понтона.

Для хранения сырой нефти с низким потенциалом бензина, керосина, дизельного топлива, мазута и тёмных нефтепродуктов применяют резервуары, рассчитанные на давление в газовом пространстве до 2 кПа. Для хранения бензина и сырой нефти с высоким потенциалом бензина применяют резервуары повышенного давления – до 70 кПа, или резервуары с плавающими крышами (понтами).

В зависимости от объёма и места расположения резервуары подразделяются на три класса (п. 1.2.6. [1]):

класс I – особо опасные резервуары: объёмом 10000 м^3 и более, а также резервуары объёмом 5000 м^3 и более, расположенные непосредственно по берегам рек, крупных водоёмов и в черте городской застройки;

класс II – резервуары повышенной опасности: объёмом от 5000 до 10000 м^3 ;

класс III – опасные резервуары: объёмом от 100 до 5000 м^3 .

Степень опасности учитывается при проектировании специальными требованиями к материалам, объёмами контроля в рабочей документации, а также при расчёте на прочность коэффициентом надёжности по назначению γ_n :

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

Разработка проектно-конструкторской документации на стальной вертикальный цилиндрический резервуар выполняется на основании Технического задания на проектирование.

Технология разработки проектно-конструкторской документации на стальной вертикальный цилиндрический резервуар включает в себя следующие основные этапы:

- 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) расчёт и конструирование днища резервуара;
- 5) расчёт и конструирование стенки резервуара;
- 6) расчёт 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 молниезащиты.

2.2 Исходные данные

Исходные данные для проектирования, предоставляемые заказчиком, в соответствии с [1, 7] должны содержать:

- Геометрические параметры или объём резервуара.
- Тип резервуара: со стационарной крышей (с понтоном или без понтона), с плавающей крышей и другие конструктивные особенности.
- Район строительства.
- Наименование хранимого продукта с указанием наличия вредных примесей в продукте (содержание серы, сульфидов водорода и т.д.) для обеспечения необходимых мероприятий.
- Удельный вес продукта.
- Максимальная и минимальная температура продукта.
- Избыточное давление и относительное разрежение.
- Нагрузка от теплоизоляции.
- Схема расположения и нагрузки от технологического оборудования.
- Потребность в зачистных люках и зумпфах.
- Оборачиваемость продукта (изменение уровня налива продукта во времени).
- Уровень подтоварной воды.
- Срок службы резервуара.
- Припуск на коррозию элементов резервуара.
- Материалы инженерно-геологических изысканий площадки строительства.

Номинальные объёмы резервуаров установившегося ряда, м³: 100, 200, 300, 400, 700, 1000, 2000, 3000, 5000, 10000, 15000, 20000. Это рекомендуемые объёмы, по желанию заказчика могут быть рассмотрены другие объёмы.

Форма бланка заказа для проектирования и изготовления резервуара

БЛАНК ЗАКАЗА - (опросный лист) (☒)- нужное зачеркнуть	ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАЛЬНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА
Покупатель _____ (наименование, почтовый адрес, телефон, факс)	
Площадка строительства _____ (наименование объекта, почтовый адрес)	
ОБЪЁМ РЕЗЕРВУАРА номинальный _____ М ³ полезный _____ М ³ проектный уровень налива _____ М ³	ТИП РЕЗЕРВУАРА <input type="checkbox"/> со стационарной крышей без понтона <input type="checkbox"/> со стационарной крышей с понтоном <input type="checkbox"/> с плавающей крышей
Хранимый продукт _____ (наименование)	
УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ 1. Расчётная минусовая температура _____ °С 2. Снеговая нагрузка _____ кг/м ² 3. Ветровая нагрузка _____ кг/м ² или скорость ветра _____ м/с 4. Сейсмичность _____ баллов 5. Плотность продукта _____ т/м ³ 6. Максимальная температура продукта _____ °С 7. Внутреннее избыточное давление _____ Па 8. Относительный вакуум _____ Па 9. Наличие теплоизоляции: <input type="checkbox"/> да <input type="checkbox"/> нет плотность _____ т/м ³ толщина на стенке _____ мм толщина на крышке _____ мм 10. Производительность подачи продукта: в резервуар _____ м ³ /ч из резервуара _____ м ³ /ч	КОНСТРУКТИВНЫЕ ДАННЫЕ 1. Внутренний диаметр стенки _____ мм 2. Высота стенки _____ мм 3. Промежуточные ветровые кольца жёсткости на стенке: <input type="checkbox"/> да <input type="checkbox"/> нет 4. Уклон днища: <input type="checkbox"/> наружу <input type="checkbox"/> внутрь 5. Тип стационарной крыши: <input type="checkbox"/> коническая самонесущая <input type="checkbox"/> коническая каркасная <input type="checkbox"/> купольная 6. Тип лестницы: <input type="checkbox"/> кольцевая <input type="checkbox"/> шахтная 7. Конструкция понтона или плавающей крыши: <input type="checkbox"/> однодечная <input type="checkbox"/> двудечная 8. Припуск на коррозию: стенки _____ мм днища _____ мм крыши _____ мм 9. Наличие стойки: <input type="checkbox"/> да <input type="checkbox"/> нет

Приложения.

1. Спецификация люков и патрубков.

2. Схемы расположения люков и патрубков в стенке и крыше резервуара.

Представитель Заказчика _____

(должность, подпись, печать, Ф.И.О.)

3 КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

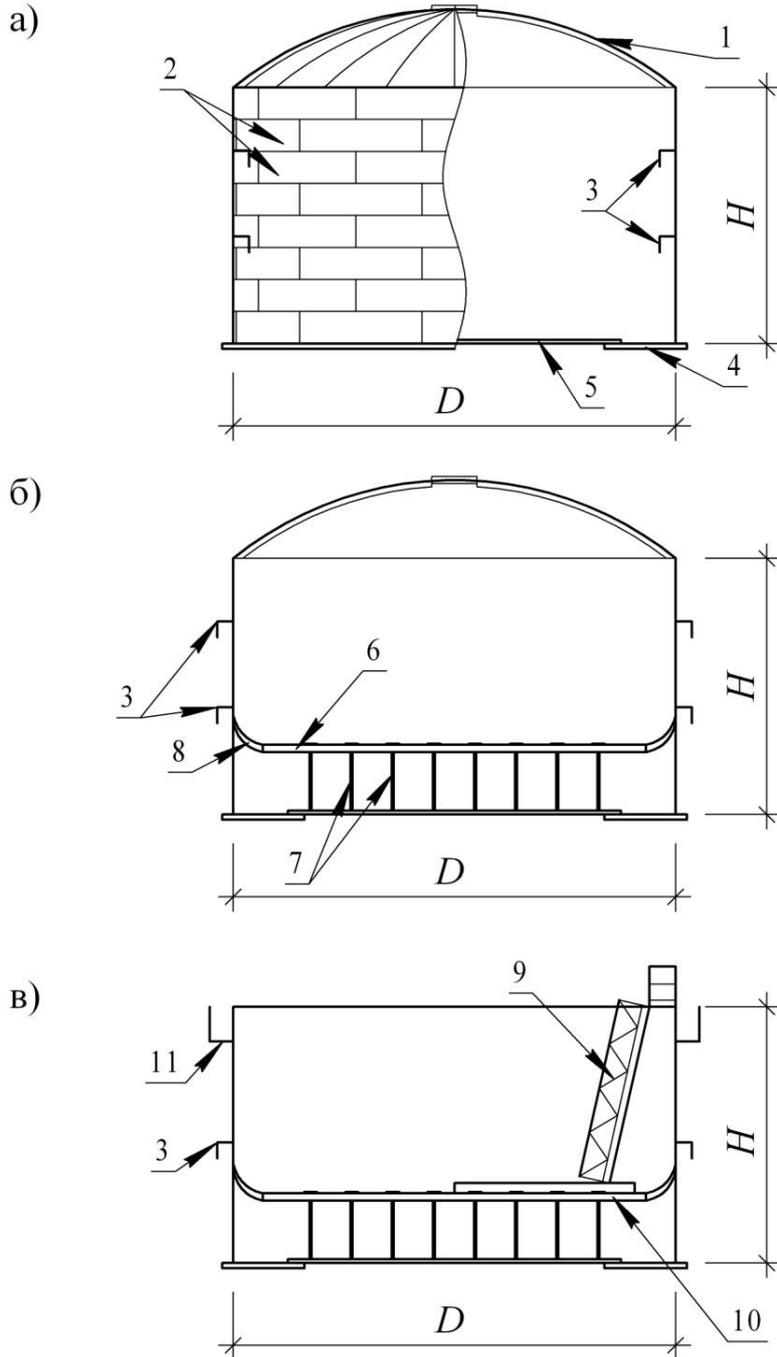
Основные конструктивные элементы резервуаров в соответствии с [1] подразделяются на группы (рис. 3.1).



Рис. 3.1 – Диаграмма-классификация элементов ВЦР

По конструктивным особенностям вертикальные цилиндрические резервуары низкого давления делятся на следующие типы (рис. 3.2):

- резервуар со стационарной крышей без понтона;
- резервуар со стационарной крышей с понтоном;
- резервуар с плавающей крышей.



1 – каркас крыши; 2 – пояса стенки; 3 – промежуточные кольца жёсткости;
 4 – кольцо окраек; 5 – центральная часть днища; 6 – понтон; 7 – опорные
 стойки; 8 – уплотняющий затвор; 9 – «катучая» лестница; 10 – плавающая
 крыша; 11 – верхнее кольцо жёсткости (площадка обслуживания)

Рис. 3.2 – Типы резервуаров

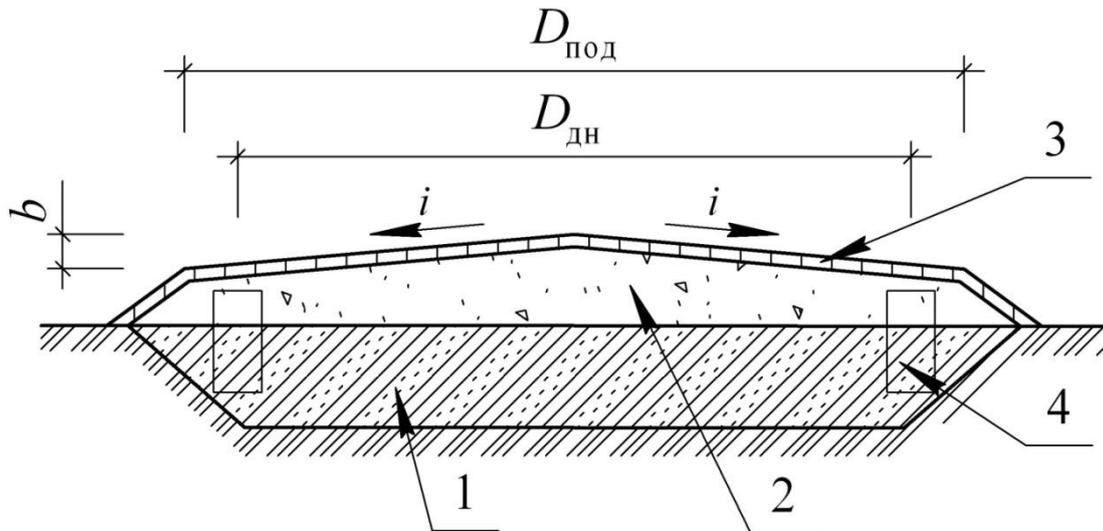
3.1 Конструкции основания и фундамента под резервуары

В качестве фундамента резервуара может быть использована грунтовая подушка (с железобетонным кольцом под стенкой и без него) (рис. 3.3) либо железобетонная плита (п. 5.6.3.1 [7]).

Сооружение резервуаров разрешается на скальных, полускальных, крупнообломочных, песчаных, глинистых и макропористых просадочных грунтах. Резервуары на макропористых грунтах можно сооружать только по специальным проектам, содержащим указания по обеспечению устойчивости резервуаров (на участках со слабыми грунтами, имеющими несущую способность менее 2 кг/см^2 , при толщине слабого грунта более 6 см необходимо уплотнять грунт). Резервуары вместимостью 300 м^3 и менее можно сооружать на черноземных и подзолистых почвах.

Для грунтовой подсыпки основания, за исключением оснований, сооружаемых на макропористых грунтах, допускается применение щебенистых, гравийных и песчаных грунтов. Из глинистых грунтов подсыпка может сооружаться только в том случае, если их влажность в момент укладки не превышает 15%, а для супесчаных и суглинистых грунтов – 20%. Укладка грунта при устройстве грунтовой подсыпки и песчаной подушки должна осуществляться горизонтальными слоями толщиной 15-20 см с тщательным послойным уплотнением, модуль деформации каждого слоя не ниже 15 МПа. Вначале удаляют растительный слой (на глубину до 300 мм). Полученную заглублённую площадку засыпают чистым грунтом или щебнем и уплотняют катками до поверхности земли. Поверх уплотнённого слоя укладывают и уплотняют подушку из чистого песка. Подушку делают высотой до 500 мм с уклоном от центра к краям. Величина уклона 1,7-2,3%.

Диаметр подушки ($D_{\text{под}}$) на 1,5-2,0 м больше диаметра днища ($D_{\text{дн}}$) резервуара. Откосы подушки отсыпают с уклоном 1:1,5 с последующим мощением. И горизонтальная часть подушки, и откосы должны быть защищены бетонной отмосткой толщиной 60-80 мм.



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

Поверх насыпной подушки устраивается гидроизолирующий слой, предохраняющий металл днища от коррозии под действием грунтовых вод и конденсата. При сооружении резервуара на макропористых просадочных грунтах гидроизолирующий слой предохраняет их от увлажнения в случае утечки нефтепродукта через днище резервуара. Для приготовления гидроизолирующего слоя применяется супесчаный грунт с влажностью до 3% и следующим гранулометрическим составом: песок крупностью 0,1-2 мм – 60-85%, песчаные пылеватые и глинистые частицы крупностью менее 0,1 мм – 40-15%. В песке допускается содержание гравия крупностью 2-20 мм (не более 25% от объема всего грунта). Супесчаный грунт тщательно перемешивается с вяжущим веществом (жидким битумом, каменноугольным дегтем, гудроном, мазутом). Содержание кислот и свободной серы в вяжущем веществе не допускается. В общем объеме смеси вяжущего вещества должно содержаться 8-10%. Толщина гидроизолирующего слоя должна составлять 100 мм, а при макропористых грунтах – 200 мм и более (в зависимости от категории просадочного грунта). Гидроизолирующий слой должен покрыть всю поверхность насыпной подушки, а при сооружении на макропористых

грунтах – и поверхность откосов подушки с выходом по всему периметру основания резервуара полосой шириной 0,5 м.

Отвод поверхностных вод от резервуаров обеспечивается планировкой и устройством отводных и нагорных канав. При строительстве резервуаров на макропористых просадочных и глинистых недренирующих грунтах планировка площадки под одну отметку запрещается. В этих случаях отвод воды из обвалования должен производиться в промышленную канализацию.

Для резервуаров вместимостью 700 м³ и более бермы и откосы основания должны моститься камнем до выполнения монтажно-сварочных работ и испытания резервуаров с последующей перемосткой.

Резервуары, расположенные на склонах, необходимо ограждать от стока поверхностных вод нагорной канавой. При большой крутизне склона, а также при близком к откосу расположении резервуара его корпус должен быть защищен от возможных оползней и падения отдельных камней. При хранении в резервуаре этилированного бензина откосы основания (если нет бетонного кольца) должны быть покрыты сборными бетонными плитами или монолитной бетонной плитой.

Для резервуаров объёмом 10000 м³ и более по периметру устраивают в песчаной подушке железобетонное кольцо (или ростверк на сваях при слабых грунтах). Фундаментное железобетонное кольцо должно иметь ширину не менее 1000 мм и толщину не менее 300 мм. Армирование кольца производится с учетом данных расчета по деформациям и на прочность.

После завершения строительства резервуара и его испытания водой нужно провести повторное нивелирование по периметру резервуара. Если неравномерная осадка вызвала недопустимые просадки основания, после спуска воды из резервуара должна быть произведена подбивка основания грунтом, применяемым для гидроизолирующего слоя.

Требования к основаниям и фундаментам приведены в нормативной литературе (п. 5.6 [7]).

3.2 Днище резервуара

Основным назначением днища является обеспечение герметичности резервуара. При правильном устройстве основания, качественном изготовлении, транспортировании и монтаже каких-либо существенных напряжений от внешней нагрузки в днище не возникает. Поэтому толщина листов днища принимается только исходя из условия сохранения его целостности на планируемый период эксплуатации. Исключение составляет периферийная часть днища. Здесь в зоне соединения днища с цилиндрической стенкой при заполнении резервуара нефтепродуктом имеет место моментное напряжённое состояние с соответствующими изгибными напряжениями.

Днище собирается из листов размерами 6000×1500 мм (5990×1490 мм после острожки кромок). Листы соединяют внахлётку или встык.

Днища резервуаров объёмом $V \leq 1000 \text{ м}^3$ имеют постоянную толщину $t_{\text{дн}} \geq 4 \text{ мм}$.

Днища резервуаров объёмом $V \geq 2000 \text{ м}^3$ имеют центральную часть и утолщённую кольцевую окрайку. Толщина листов центральной части $t_{\text{дн ц}} \geq 4 \text{ мм}$. Толщина листов окрайки зависит от толщины нижнего пояса стенки резервуара и $t_{\text{дн окр}} \geq 6 \text{ мм}$ (табл. 3.2 [1]).

Примеры конструктивных схем днища изображены на рис. 3.4. Для резервуаров объёмом более 5000 м³ крайние листы (окрайки) выполняют в виде сегментов.

На окрайки непосредственно опирается цилиндрическая стенка резервуара, образуя узел соединения стенки с днищем. Принятое значение толщины проверяется расчётом на прочность по изгибным напряжениям, возникающим в месте соединения окрайки днища с цилиндрической стенкой резервуара.

Соединение цилиндрической стенки резервуара с окрайками днища выполняется двухсторонними угловыми швами с обязательным контролем качества швов физическими методами. При этом высота катета указанных швов

должна быть не менее номинального значения толщины более тонкого из соединяемых элементов.

В месте опирания корпуса резервуара поверхность крайков должна быть гладкой. Это достигается сваркой крайков встык или вырезкой крайков, которые у края днища свариваются встык на специальной подкладке [12].

Наружный контур окраек должен иметь вид окружности и выступать за внешнюю поверхность стенки резервуара не менее чем на 50 мм и не более 100 мм [7].

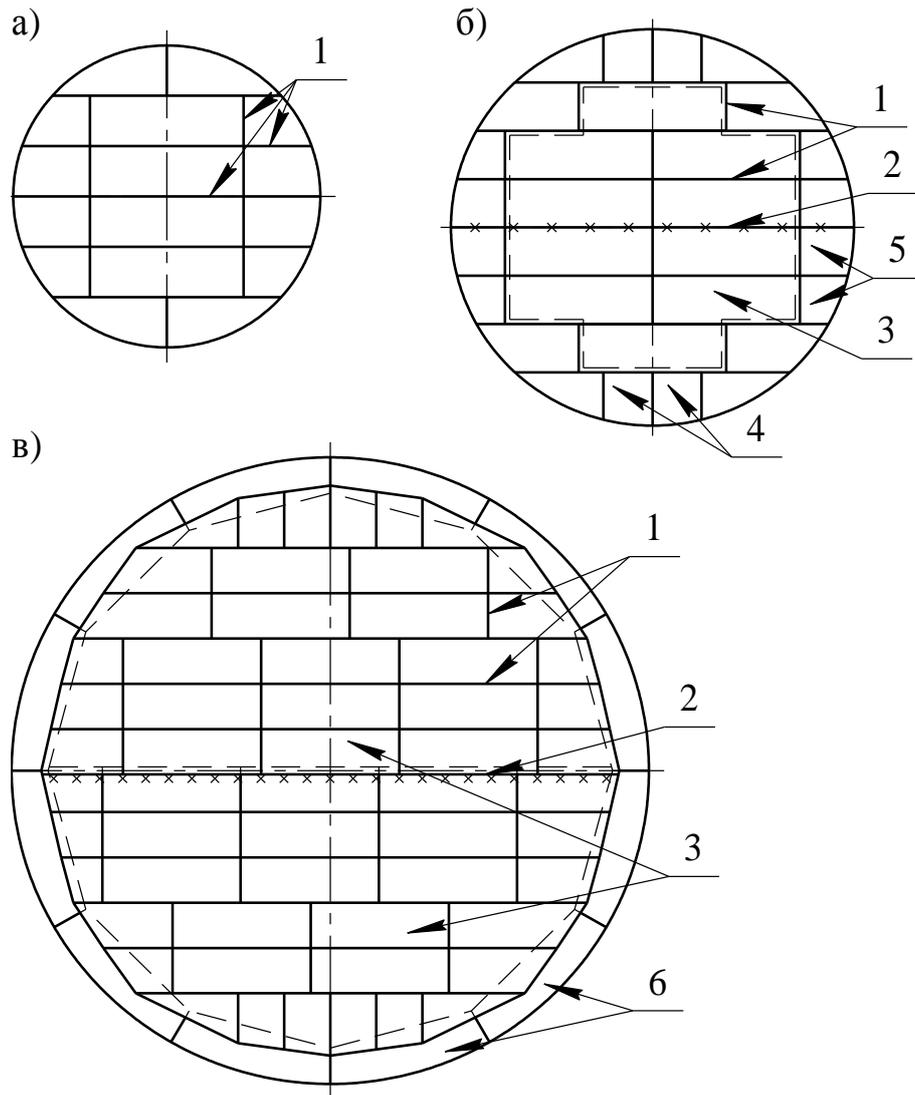
Расстояние от наружной кромки окраек до стыков их с листами центральной части днища должно быть не менее 1000 мм. Стыки нижнего пояса корпуса и стыки крайков днища следует смещать по крайней мере на 200 мм [12].

Днища резервуаров должны быть коническими с уклоном к центру или от центра. Для резервуаров объёмом до 1000 м³ включительно допускается применение плоских днищ.

Монтаж днища может осуществляться двумя способами: листовым или рулонным.

В основном, днище на рабочую площадку поставляется в виде рулонных заготовок заводского изготовления. Монтаж выполняется путём разворачивания рулонов с последующим соединением их между собой односторонним швом внахлест. Монтажный стык, соединяющий отдельные полотнища, должен проходить через центр развёртки конструкции, чтобы на монтаже можно было получить требуемую коническую форму конструкции (с небольшим углом наклона в сторону центра или наоборот). Швы одного полотнища в месте монтажного стыка должны быть сдвинуты относительно аналогичных швов другого полотнища не менее чем на 100-150 мм. Минимальная величина нахлестки в монтажном стыке – 30 мм, но обычно составляет 50-60 мм [12].

При рулонировании ширина отправочной марки днища должна быть менее 12 м и менее ширины рулонируемого полотнища стенки.



а) – из листов одинаковой толщины;

б) – с прямоугольными крайками;

в) – с сегментными крайками.

1 – заводские швы; 2 – монтажные швы; 3 – листы центральной части днища;

4 – прямоугольные крайки поперечные; 5 – прямоугольные крайки

продольные; 6 – сегментные крайки

Рис. 3.4 – Схема днища

3.3 Цилиндрическая стенка резервуара

Цилиндрическая стенка является главной несущей конструкцией вертикальных цилиндрических резервуаров. Все её конструктивные элементы должны сохранять в процессе эксплуатации прочность, устойчивость и герметичность.

В большинстве случаев цилиндрическая стенка собирается из отдельных листов размерами 6000×1500 мм (5990×1490 мм после острожки кромок). Возможны и другие параметры листов стенки 6000×2000 мм, 8000×2000 мм. Положение листов в стенке принимается таким образом, чтобы длинная сторона каждого отдельного листа была направлена по горизонтали (рис. 3.5). Горизонтальные ряды листов стенки называются поясами. Каждый отдельный пояс состоит из листов одной толщины. Толщина поясов определяется расчётом и, как правило, увеличивается от верхних поясов к нижним (соответствуя закону распределения гидростатического давления).

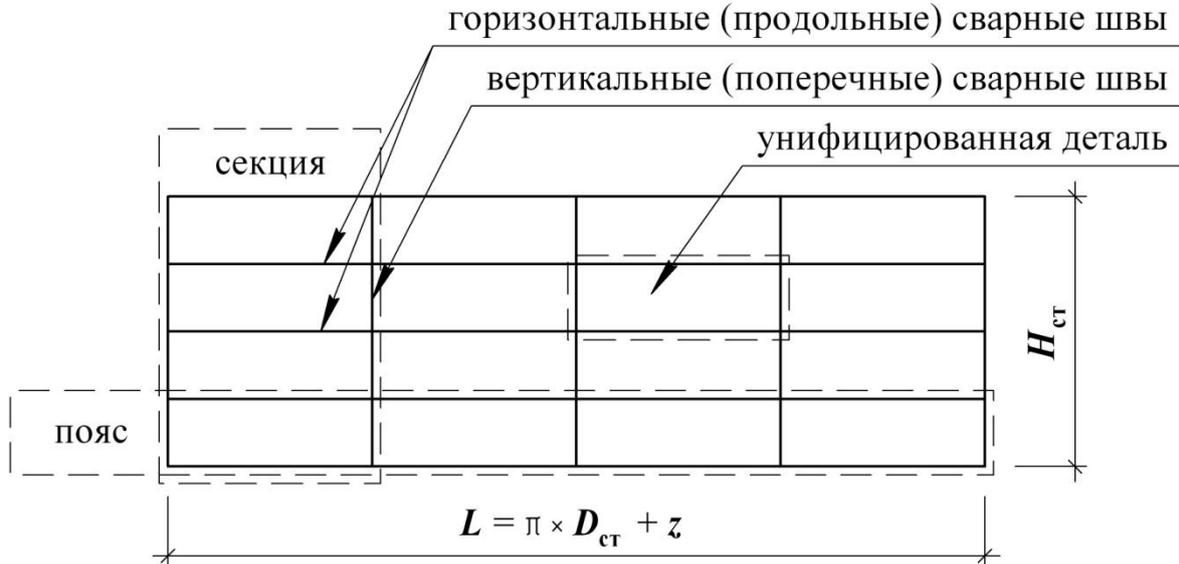
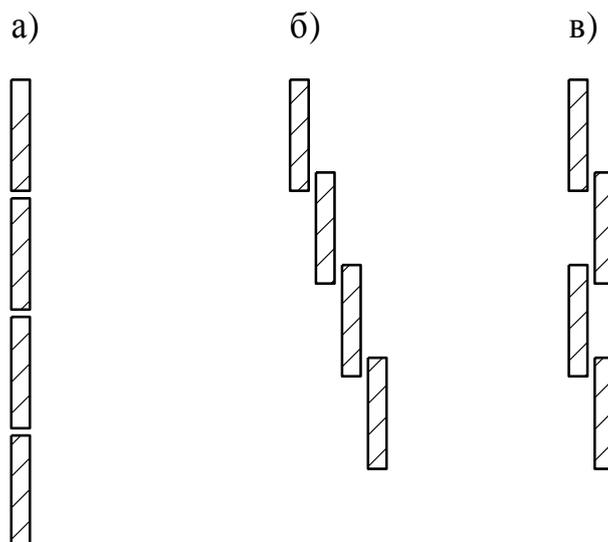


Рис. 3.5 – Схема развёртки стенки резервуара

Все соединения листов в поясе делаются встык. Пояса между собой могут соединяться встык или внахлёстку в телескопическом или ступенчатом порядке (рис. 3.6).



а) – встык; б) – телескопическое; в) – ступенчатое

Рис. 3.6 – Типы соединений поясов по высоте стенки

Монтаж цилиндрической стенки может осуществляться двумя способами: листовым или рулонным. Метод рулонирования обладает рядом преимуществ: трудоёмкость монтажа, общие затраты на сооружение резервуара, сроки возведения снижаются; повышается качество сварных швов и надёжность резервуаров. Однако максимальное значение толщины листов, сворачиваемых в рулоны, ограничивается 16-18 мм (п. 4.5.1. [1]). Ширина полотнища стенки ограничивается 18 м по условиям изготовления на рулонном оборудовании (рис. 3.7). Длина полотнища должна быть не более 66 м по условиям перевозки железнодорожным транспортом (наружный диаметр навёрнутого на каркас полотнища с учётом допускаемой неплотности навивки должен быть не более 3,2 м), а общая масса одного рулона до 60 т. Разница в толщине смежных листов должна быть не более 2 мм по условиям сварки без скоса кромок листов.

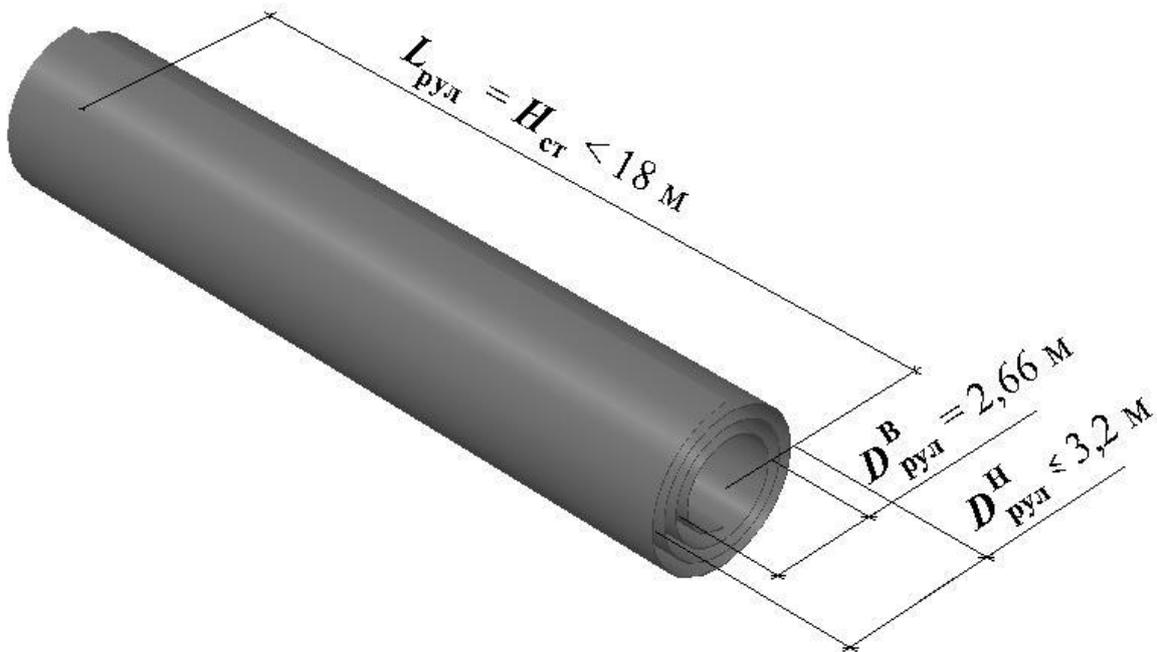


Рис. 3.7 – Габариты рулонируемого полотнища стенки

Компоновка поверхности цилиндрической стенки может быть произведена с использованием различных вариантов.

Для листового способа монтажа компоновка может быть самой разнообразной, но при этом нужно, чтобы в любом случае вертикальные сварные соединения листов в смежных поясах стенки были смещены относительно друг друга на величину $8t$, где t – толщина нижележащего пояса (п. 3.2.1. [1]) (рис. 3.8).

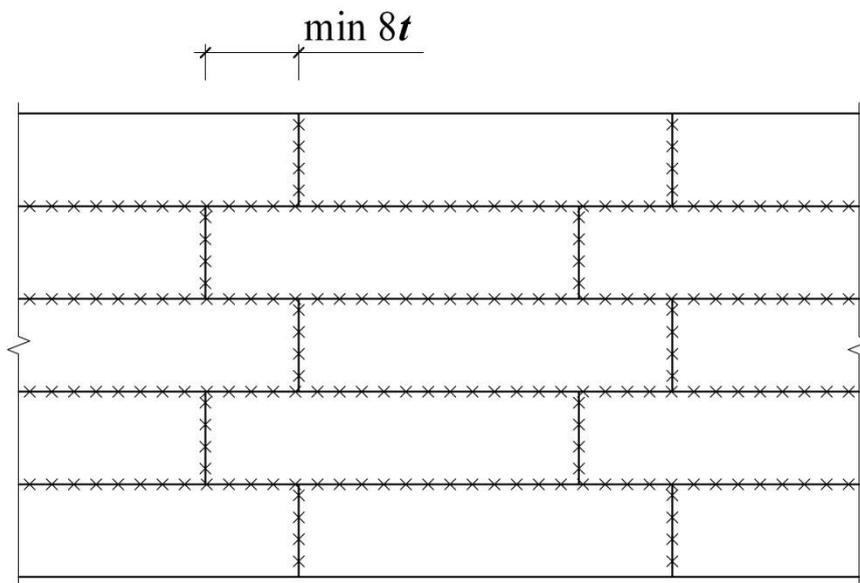


Рис. 3.8 – Компоновка листов стенки для листового способа монтажа

Для резервуаров II и III класса при изготовлении стенки из рулонных полотнищ допускаются вертикальные заводские и монтажные стыковые соединения без смещения. Для рулонированных стенок наиболее простым является вариант компоновки, показанный на рисунке 3.9, а. Однако зарубежные стандарты не рекомендуют устраивать сквозные на всю высоту стенки сварные стыки. Поэтому иногда применяют другие виды компоновки (рисунок 3.9, б). Во всех этих случаях монтажные соединения рулонов осуществляются встык или внахлест. В последнее время усиленно осваивается стыковка рулонов с использованием так называемых «зубчатых» стыков (рисунок 3.9, в), хотя при такой стыковке трудоёмкость устройства монтажного стыка значительно возрастает.

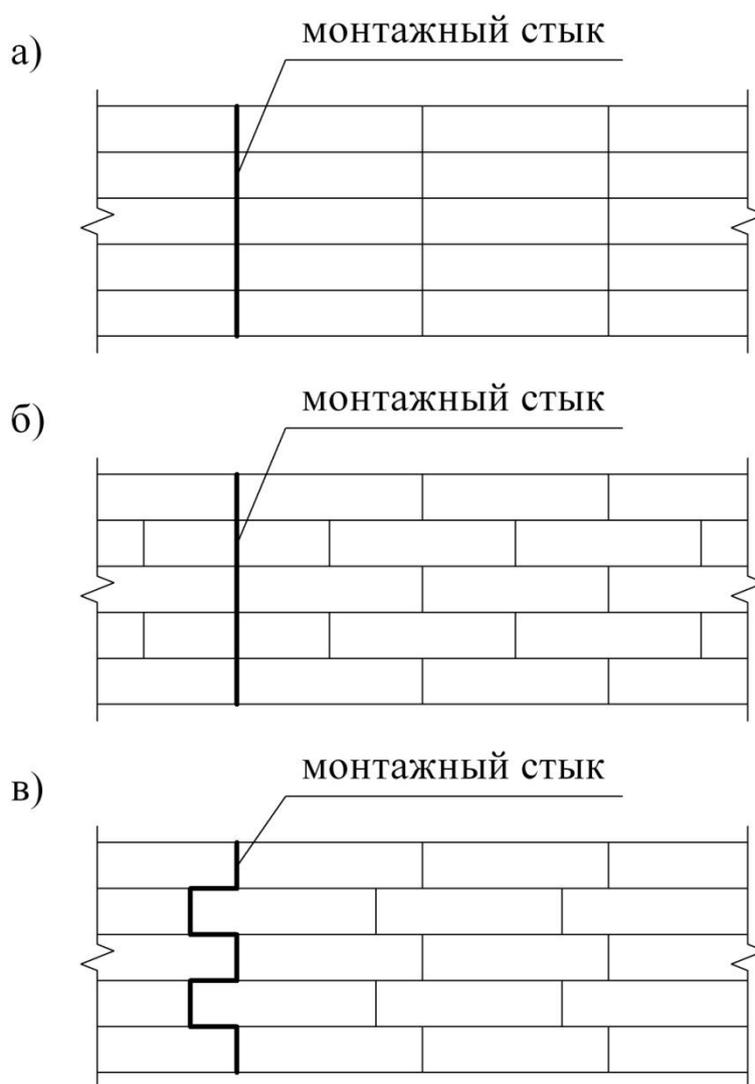


Рис. 3.9 – Компоновка листов стенки для рулонного способа монтажа

Расчётные значения толщины листов каждого пояса определяются в соответствии с требованиями [1, 2, 5]. Для сейсмоопасных районов строительства проводят дополнительную проверку несущей способности стенки.

Стенка резервуара должна иметь основное кольцевое ребро жёсткости, которое устанавливается в верхней части стенки, снаружи или изнутри. В резервуарах со стационарной крышей основное кольцевое ребро жёсткости должно одновременно служить опорной конструкцией для крыши. Сечение кольца жёсткости определяется расчётом. Для обеспечения устойчивости стенки могут устанавливаться промежуточные кольцевые рёбра жёсткости. Кольцевые рёбра жёсткости должны иметь неразрезное сечение по всему периметру стенки. Кольца жёсткости должны отстоять не менее чем на 150 мм от горизонтальных швов стенки, а их монтажные стыки не менее чем на 150 мм – от вертикальных швов стенки. Конструкция колец жёсткости не должна допускать скопления в них воды (рис. 3.10).

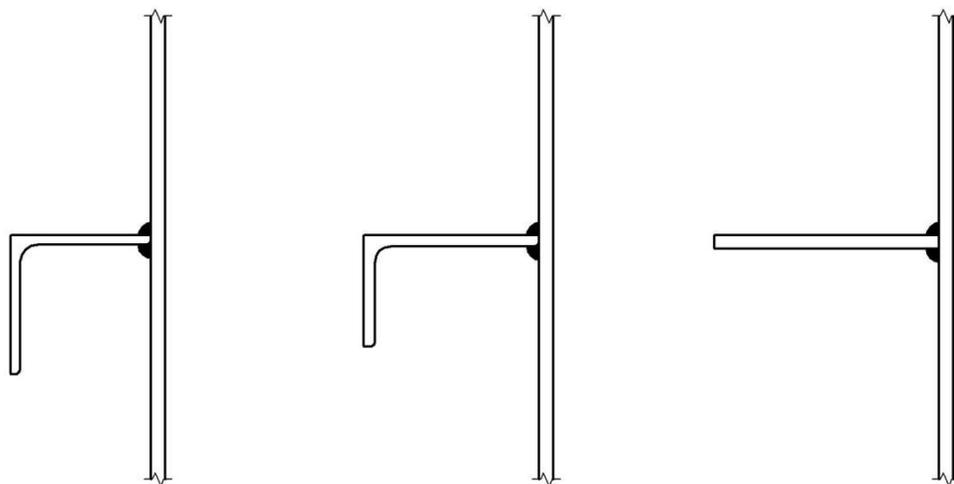


Рис. 3.10 – Варианты сечений промежуточных колец жёсткости

В ряде случаев могут быть приняты решения усиленной стенки, предусматривающие установку различных дополнительных элементов для увеличения её прочности [8, 9]: дополнительная стенка, гибкие и жёсткие бандажи, высокопрочная проволока с усилием предварительного напряжения. В некоторых случаях конкурентоспособным может оказаться многостенчатый

резервуар, в котором используется идея уравнивания столбов хранимой жидкости, находящихся одновременно в нескольких отсеках. Все такие решения становятся актуальными в случаях, когда по расчёту толщина нижних поясов однослойной цилиндрической стенки оказывается больше ограничений, введённых по толщине поясов для резервуаров, изготавливаемых методом рулонирования.

3.4 Стационарная кровля

Резервуары низкого давления со стационарной крышей в зависимости от конструкции покрытия могут быть:

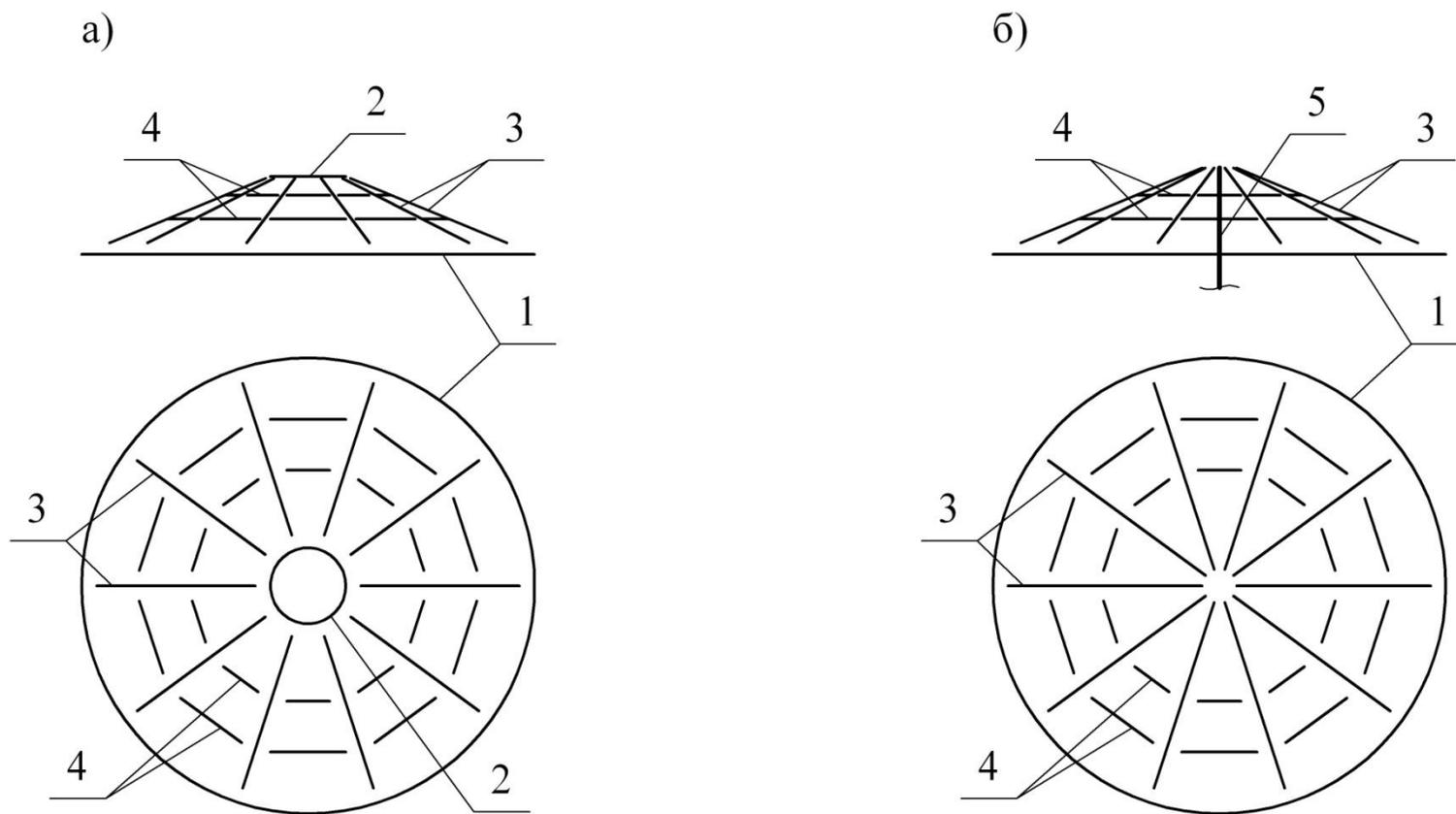
- с каркасной крышей, с центральной стойкой или без неё (конической или сферической);
- с бескаркасной крышей и центральной стойкой (висячая, «безмоментная кровля»).

Опираются стационарные крыши на стенку резервуара (на кольцевой элемент жёсткости) и центральную стойку, либо только на стенку (распорная система). Для сферической крыши применяется только распорная конструкция.

Бескаркасная крыша применяется при небольших снеговых нагрузках (до $1,5 \text{ кН/м}^2$) и малых объёмах (до 5000 м^3) [7, 8].

Для резервуаров объёмом до 5000 м^3 применяется также каркасная коническая кровля (рис. 3.11), для резервуаров объёмом более 5000 м^3 – каркасное сферическое покрытие. Каркас сферической крыши следует выполнять ребристым, ребристо-кольцевым или сетчатым (рис. 3.12). Сетчатые крыши экономичнее ребристых по расходу стали и трудоёмкости изготовления.

Угол наклона образующей конической крыши к горизонтальной поверхности принимается от $\approx 4,7^\circ$ (уклон 1:12) до $\approx 9,5^\circ$ (уклон 1:6) [1].

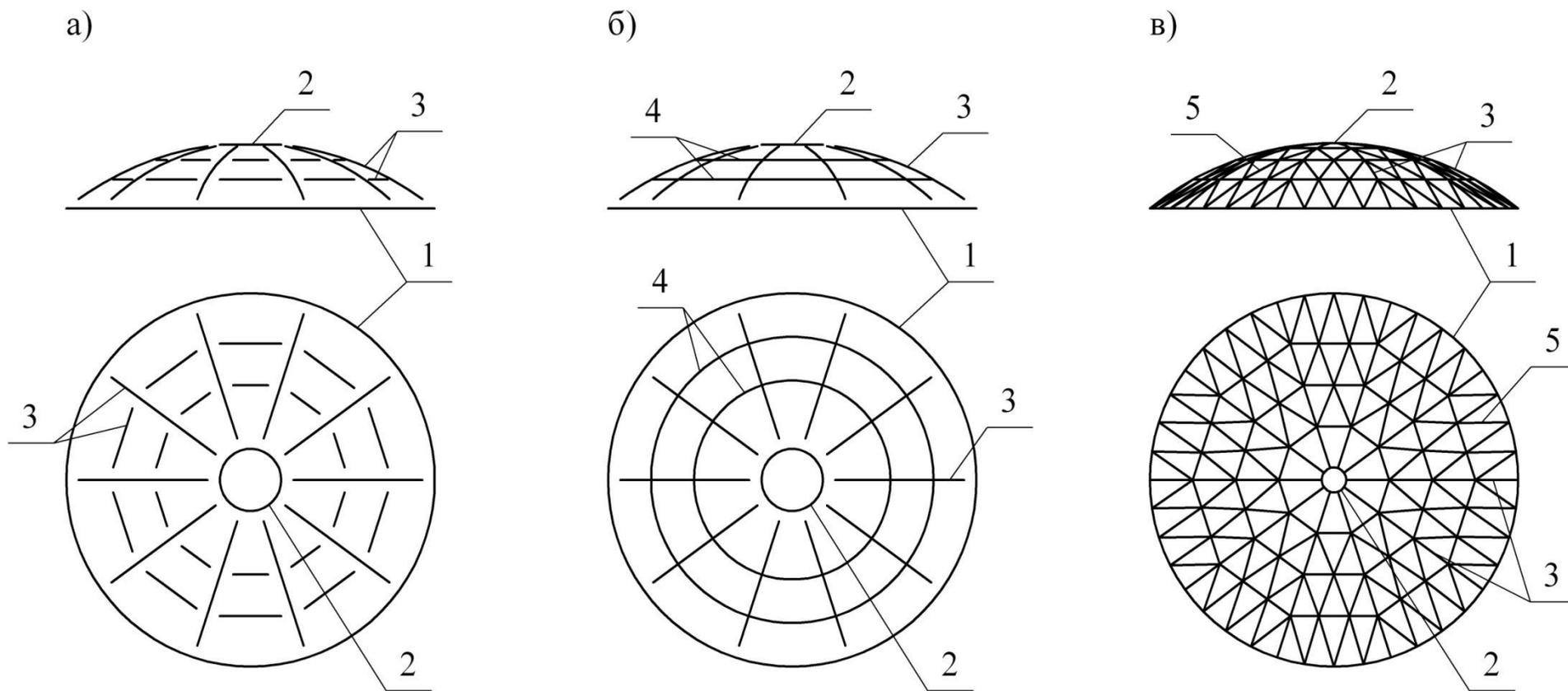


а) без центральной стойки; б) с центральной стойкой;

1 – нижнее опорное кольцо; 2 – верхнее опорное кольцо; 3 – продольные рёбра;

4 – поперечные рёбра; 5 – центральная стойка

Рис. 3.11 – Схемы конической каркасной кровли



а) ребристый; б) ребристо-кольцевой; в) сетчатый;

1 – нижнее опорное кольцо; 2 – верхнее опорное кольцо; 3 – рёбра; 4 – промежуточные кольца; 5 – сетка

Рис. 3.12 – Конструктивные решения купольных покрытий

Минимальный радиус сферической поверхности равен $0,8D$, максимальный радиус – $1,5D$, где D – диаметр резервуара.

Минимальная толщина настила для конической кровли равна 4 мм, для сферической – 5 мм.

Конические и сферические каркасные крыши обычно состоят из сборных секторных щитов заводского изготовления. Щиты состоят из радиальных и поперечных рёбер (прокатные или гнутые профили) и обшивки из стальных листов. Количество щитов принимается из условия габаритности при перевозках (ширина щита должна быть в пределах 3,2 – 3,85 м) [10]. Расстояние между поперечными (кольцевыми) балками назначается кратным 100 мм (в дальнейшем уточняется расчётом); длиной участка, примыкающего к опорному кольцу, обычно компенсируются возможные невязки. Монтаж каркасных конических и сферических крыш производится с временной центральной стойкой. На ней устанавливается центральное кольцо, к которому крепятся все щиты кровли. Щиты между собой свариваются внахлёт. Диаметр верхнего опорного кольца – 1500-2500 мм.

Сферические крыши конструируют в виде ребристо-кольцевых куполов для резервуаров объёмом 6000 м^3 и более и сетчатыми при объёмах 10000 м^3 и более.

Допускается применение стационарных крыш из алюминиевых сплавов (приложение Б [7]). Купольные алюминиевые крыши поставляются на российский рынок зарубежными фирмами, поэтому необходимо в соответствии с российскими нормами выполнять поверочные расчёты таких крыш.

3.5 Понтон и плавающая крыша

Для сокращения потерь нефтепродуктов от испарений по технологическим соображениям внутри резервуара устанавливается понтон или плавающая крыша (рис. 3.2, б, в). Установка понтона не исключает устройства

стационарной кровли, а плавающая крыша – это конструкция, которая совмещает в себе свойства понтона и кровли.

Плавающие крыши применяются в резервуарах, эксплуатирующихся в районах с расчётным весом снегового покрова до 1,8 кПа [11].

Конструктивные решения понтона и плавающей крыши подобны. Плавающие крыши могут быть двух основных типов: однодечные (герметичные короба по периметру крыши) и двудечные (герметичные короба по всей поверхности крыши). Понтоны могут быть также поплавкового типа.

Пространство между стенкой резервуара и понтоном или плавающей крышей (200-300 мм), а также между патрубками понтона и направляющими трубами должно быть уплотнено при помощи затворов. Применяют затворы мягкого и жёсткого типов.

В нижнем положении понтон и плавающая крыша опираются на стойки, прикреплённые к ним с определённым шагом по концентрическим окружностям.

Для исключения вращения должны использоваться направляющие в виде труб или вертикально натянутые тросы, которые одновременно могут выполнять технологические функции.

3.6 Лестницы, площадки, ограждения, переходы

Для доступа обслуживающего персонала устраивают лестницы. Лестницы для подъёма на резервуар могут выполняться отдельно стоящими, с опиранием на собственный фундамент (шахтные) или кольцевыми – полностью опирающимися на стенку резервуара.

Шахтные лестницы (рис. 3.13) являются конструктивно-технологическим элементом, выполняющим роль собственно лестницы для подъёма на крышу резервуара, а также служащим каркасом, на который наворачивается полотнище стенки (для резервуаров объёмом до 3000 м³ совместно со стенкой могут сворачиваться полотнища днища и крыши).

Недостатки шахтных лестниц:

- требуют устройства отдельного фундамента;
- крепятся к стенке резервуара несколькими рядами радиальных распорок, которые вызывают в стенке нежелательные концентрации напряжений, особенно при воздействии сейсмических нагрузок.

Кольцевые лестницы (рис. 3.14) не имеют указанных недостатков применения шахтных лестниц.

Минимальная ширина лестницы 700 мм, максимальный угол по отношению к горизонтальной поверхности – 50°. Ступени лестниц изготавливают из перфорированного, решётчатого или рифлёного металла. Минимальная ширина ступеней – 200 мм; высота одинаковая и не более 250 мм. Конструкция лестницы должна выдерживать сосредоточенный груз 4,5 кН. При полной высоте лестницы более 9 м конструкция лестницы должна включать в себя промежуточные площадки, разница между вертикальными отметками которых не должна превышать 6 м.

Для обеспечения требований безопасности и удобства обслуживания установленного оборудования рекомендуется круговое расположение площадок по периметру крыши (рис. 3.14). Для резервуаров без понтона объёмом свыше 1000 м³ допускается выполнение площадок на ¾ периметра (рис. 3.13).

Группы соседних резервуаров могут быть соединены между собой переходами. На каждую группу резервуаров должно быть, по крайней мере, две лестницы (с противоположных сторон). Минимальная ширина переходов 700 мм. Конструкция площадок и переходов должна выдерживать сосредоточенный груз 4,5 кН (на площадке 100×100 мм).

Ограждения должны устанавливаться по всему периметру стационарной крыши по наружной стороне площадок; по краям переходов, лестниц. Ограждение должно выдерживать нагрузку 0,9 кН, приложенную в любом направлении в любой точке поручня. Ограждения стандартно изготавливаются из углового профиля, но также могут быть выполнены из труб.

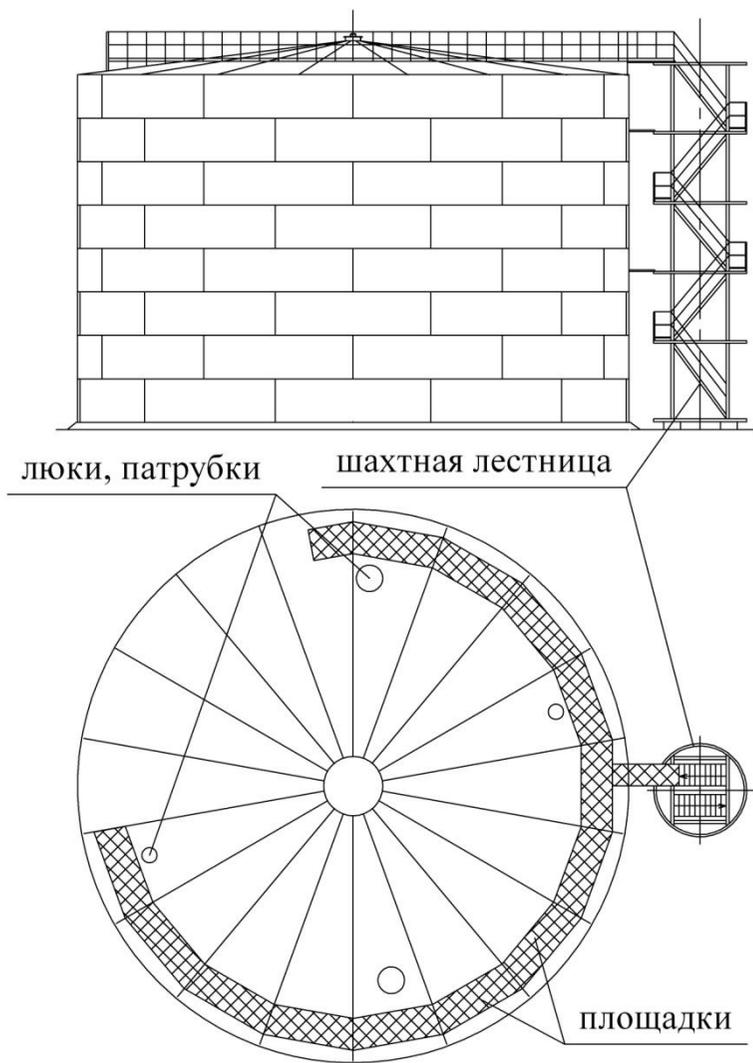


Рис.3.13 – Шахтная лестница и площадки на $\frac{3}{4}$ крыши

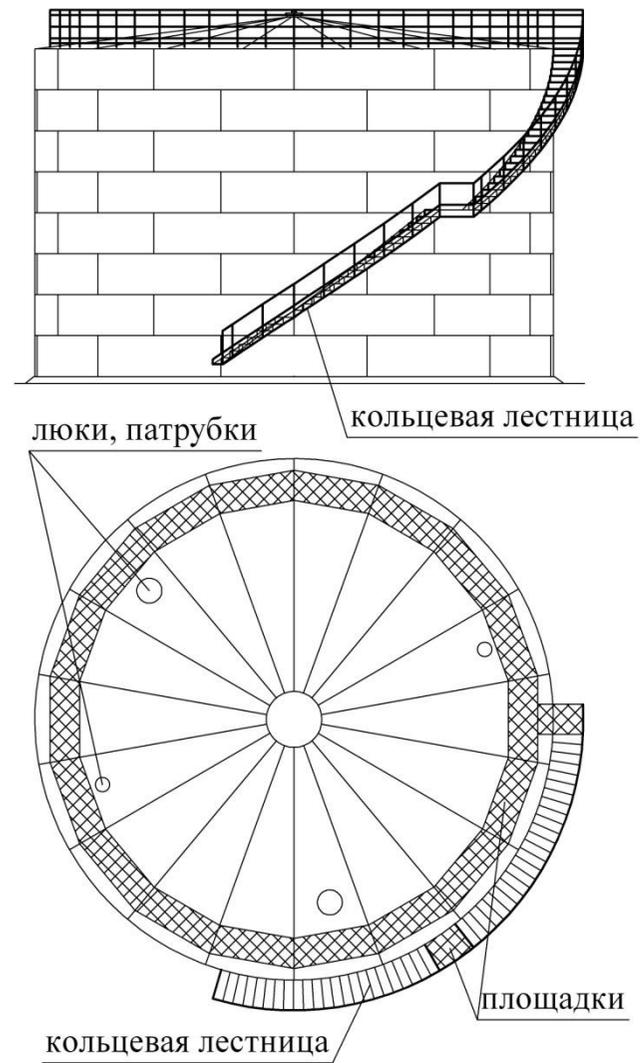


Рис.3.14 – Кольцевая лестница и площадки по периметру крыши

Для доступа на плавающие крыши устанавливаются «катучие» лестницы (рис. 3.2). Они имеют верхнее шарнирное крепление к стенке резервуара и нижние ролики, перемещающиеся по направляющим рельсам (опорной балке, ферме), установленным на крыше. Таким образом, лестница автоматически следует любому положению крыши по высоте. «Катучая» лестница имеет ограждения с двух сторон и самовыравнивающиеся ступени.

3.7 Анкерное крепление стенки

Анкерное крепление стенки резервуара должно устанавливаться в случаях, если опрокидывающий момент резервуара от воздействия расчётной ветровой или сейсмической нагрузок превышает удерживающий момент [7].

Анкерные крепления должны располагаться по периметру стенки резервуара на равных расстояниях, не более 3 м друг от друга. При использовании в качестве анкеров болтов их диаметр должен быть не менее 24 мм.

3.8 Центральная стойка

В середине резервуара щиты опираются на оголовок центральной стойки. Центральная стойка в резервуарах ёмкостью 1000, 2000, 3000 и 5000 м³ выполняется трубчатой (кольцевого сечения), а в резервуарах ёмкостью 300, 400 и 700 м³ – решётчатой (такие более экономичны) [12].

Сечение центральной стойки по конструктивным соображениям (с учётом условий опирания щитов покрытия и использования стойки для рулонирования элементов резервуара) принимают диаметром более 0,4 м (по расчёту на устойчивость требуется меньшее сечение).

Стойка крепится к днищу анкерами или приваривается по контуру опорного кольца [13]. Для предотвращения отрыва трубчатой стойки от днища её заполняют песком.

4 ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ СТЕНКИ, ДНИЩА И КРЫШИ РЕЗЕРВУАРА

Выбор марок сталей для элементов резервуаров зависит от ряда условий: района строительства (температура наиболее холодных суток); вместимости резервуаров; интенсивности эксплуатации (оборачиваемости хранимых продуктов в год); степени агрессивности среды; пожароопасности хранимых продуктов.

Строительными нормами [14] стальные резервуары отнесены к I-ой и II-ой группам конструкций. К группе I относятся стенки и окрайки днищ резервуаров вместимостью 10 тыс. м³ и более, фасонки крыш резервуаров. К группе II – стенки и окрайки днищ резервуаров вместимостью менее 10 тыс. м³, покрытия, опорные кольца покрытия и кольца жёсткости, центральные части днищ, понтоны и плавающие крыши резервуаров всех вместимостей.

В соответствии с [1] все элементы конструкций по требованиям к материалам разделяются на две группы (рис. 3.1): основные конструкции (подгруппы «А» и «Б»), вспомогательные конструкции.

Для конструкций резервуаров должна применяться сталь, выплавленная электропечным, кислородно-конвертерным или мартеновским способом. В зависимости от требуемых показателей качества и толщины проката сталь должна поставляться в состоянии после горячей прокатки, термической обработки (нормализации или закалки с отпуском) или после контролируемой прокатки.

Для основных конструкций подгруппы «А» должна применяться только спокойная (полностью раскисленная) или низколегированная сталь. Для основных конструкций подгруппы «Б» должна применяться спокойная или полуспокойная сталь. Для вспомогательных конструкций наряду с вышеперечисленными сталями с учётом температурных условий эксплуатации допускается применение кипящей стали.

Выбор марки стали для основных элементов конструкций должен производиться с учётом гарантированного минимального предела текучести, ударной вязкости, толщины проката. При этом одним из основных критериев при выборе марки стали является ударная вязкость, характеризующая склонность металла к хрупкому разрушению. Нормированная величина ударной вязкости зависит от гарантированного минимального предела текучести и направления вырезки образцов (поперечных или продольных). На поперечных образцах для листов низколегированной стали (НЛ) с пределом текучести 345 МПа и ниже она должна быть равна не менее 35 Дж/см², для листов НЛ стали с более высоким гарантированным пределом текучести должна составлять не менее 50 Дж/см². Для фасонного проката нормируемое значение ударной вязкости марки стали повышается по сравнению с листовым прокатом аналогичной толщины на 20 Дж/см².

Значение ударной вязкости определяется при расчётной температуре эксплуатации металла. При этом за расчётную температуру металла принимается наиболее низкое из двух следующих значений:

- минимальная температура складированного продукта;
- температура наиболее холодных суток для данной местности (минимальная среднесуточная температура), повышенная на 5°С.

При определении расчётной температуры металла не учитываются температурные эффекты специального обогрева и теплоизоляции резервуаров. Температура наиболее холодных суток для данной местности определяется с обеспеченностью 0,98 по таблице температур наружного воздуха в соответствии с требованиями строительных норм и правил.

Для резервуаров с рулонной технологией сборки расчётная температура металла при толщинах более 10 мм понижается на 5°С.

Другим немаловажным фактором, обеспечивающим надёжность конструкций резервуара с учётом большого количества сварных швов является обеспечение прочности и вязкости металла сварного соединения не ниже, чем требуется для исходного основного металла. При этом углеродный эквивалент

стали с пределом текучести 390 МПа и ниже для основных элементов конструкций не должен превышать 0,43, где значение углеродного эквивалента определяется по формуле:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{V}}{14} + \frac{\text{P}}{2}, \quad (4.1)$$

где C, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, V, P – массовые доли углерода, марганца, кремния, хрома, никеля, меди, ванадия и фосфора по результатам плавочного анализа. При отсутствии в сертификатах на сталь сведений о содержании меди и ванадия расчёт углеродного эквивалента производится из условия содержания в прокате меди и ванадия в количестве 0,30 и 0,01% по массе соответственно.

Сварочные материалы (электроды, сварочная проволока, флюсы, защитные газы) выбираются в соответствии с требованиями технологического процесса изготовления и монтажа конструкций, а также выбранных марок стали. При этом применяемые сварочные материалы и технология сварки должны обеспечивать механические свойства сварного шва не ниже свойств, установленных требованиями для выбранных сталей.

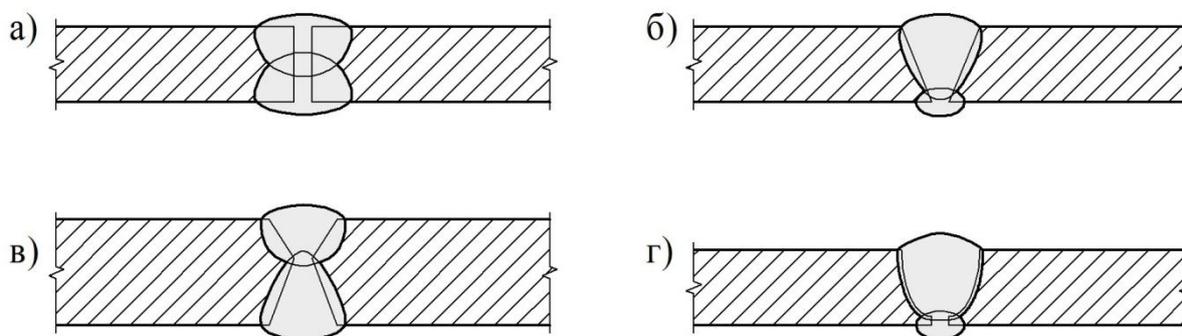
Конструктивные элементы сварных соединений и швов, как правило, должны соответствовать требованиям стандартов на применяемый вид сварки: для ручной дуговой сварки; для автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом; для дуговой сварки в среде защитных газов.

Принимая во внимание особенности работы и эксплуатации резервуарных конструкций, а также их функциональное назначение, особые требования предъявляются к качеству сварных швов. При этом сварные швы соединений должны быть плотнопрочными и соответствовать основному металлу по показателям стандартных механических свойств металла шва: пределу текучести, временному сопротивлению, относительному удлинению, ударной вязкости, загибу в холодном состоянии на 180°.

Для улучшения коррозионной стойкости металл шва и основной металл по химическому составу должны быть близки друг к другу.

В зависимости от назначения сварного шва (вертикальные и горизонтальные соединения поясных листов, соединения стенки и днища и т.д.) в строительных конструкциях резервуаров применяются несколько типов сварных соединений.

Как правило, вертикальные соединения стенки (за исключением монтажного стыка) выполняются стыковыми с полным проплавлением по толщине листов (рис. 4.1).

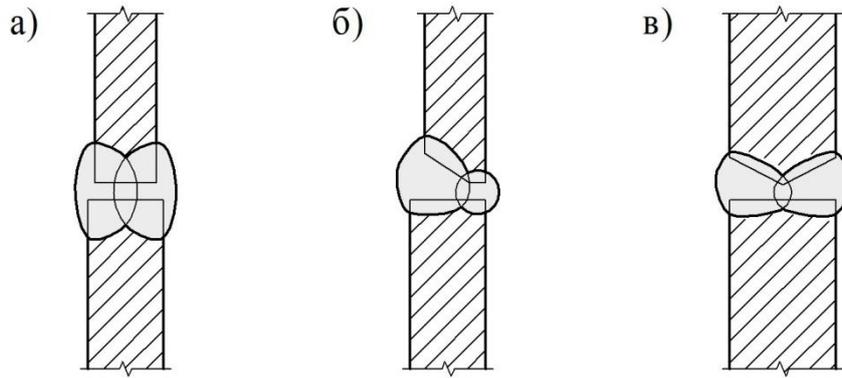


- а) без разделки кромок; б) со скосом двух кромок; в) с двумя скосами кромок;
г) с криволинейным скосом кромок

Рис.4.1 – Вертикальные стыковые соединения стенки

Горизонтальные соединения стенки выполняются двусторонними стыковыми швами с полным проплавлением (рис. 4.2).

Стыковые соединения для листов днища применяются при заводском изготовлении рулонизируемых полотнищ днищ. Стыковые соединения на остающейся подкладке применяются для сварки кольцевых окроек, а также при полистовой сборке центральной части днищ. Нахлесточные соединения днища применяются для соединения между собой рулонизируемых полотнищ днищ, листов центральной части днищ при их полистовой сборке, а также для соединения центральной части днищ с кольцевыми окрайками (рис. 4.3, 4.4).



а) без разделки кромок; б) с криволинейным скосом одной кромки верхнего листа; в) с двумя скосами одной кромки верхнего листа

Рис.4.2 – Горизонтальные стыковые соединения стенки

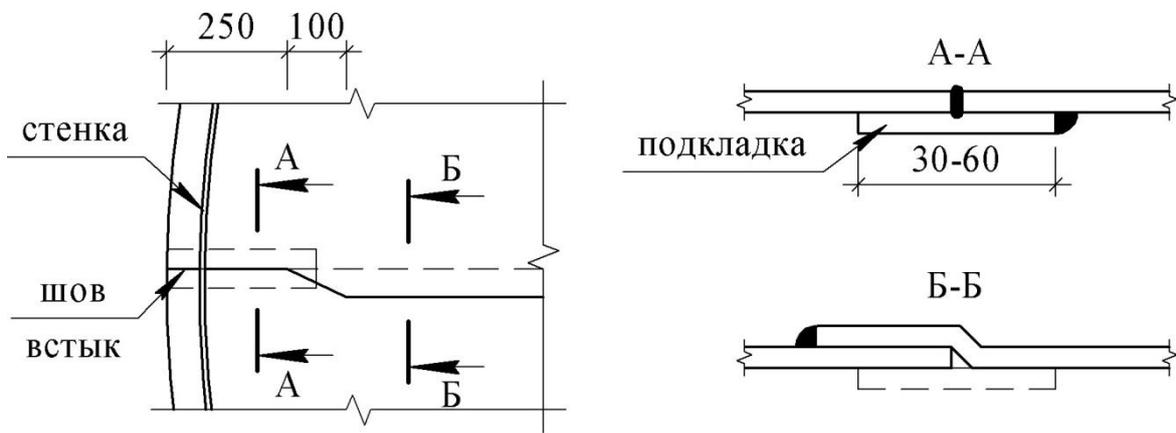


Рис.4.3 – Соединения листов днища

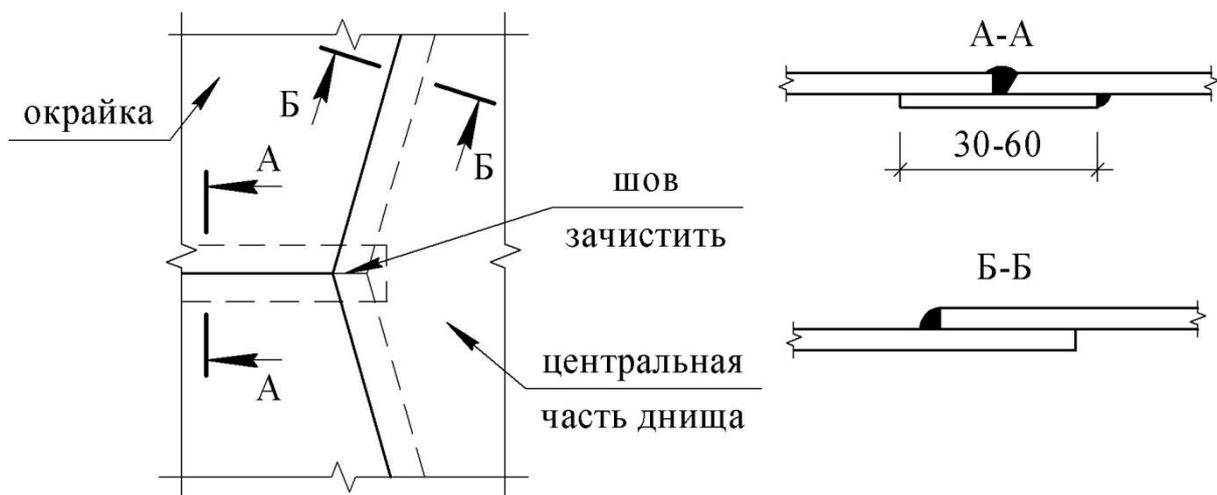
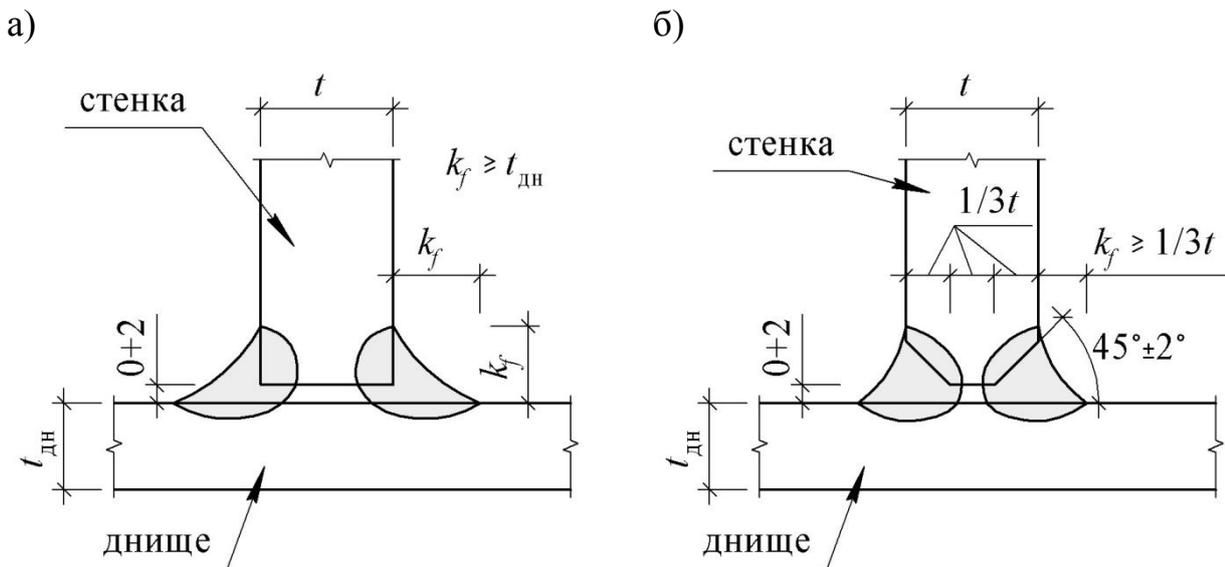


Рис.4.4 – Соединения центральной части с окрайками днища

Для соединения днища со стенкой применяется тавровое соединение. Для резервуаров с толщиной листов нижнего пояса стенки 20 мм и менее рекомендуется тавровое сварное соединение без разделки кромок (рис. 4.5, а). Размер катета каждого углового шва должен быть не более 12 мм и не менее номинальной толщины окрайки. Для резервуаров с толщиной листов нижнего пояса стенки более 20 мм применяется тавровое сварное соединение с разделкой кромок, представленное на рис. 4.5, б. Сварные швы должны выполняться, как минимум, в два прохода.

Для соединения листов крыши применяются стыковые и нахлесточные соединения.



а) при толщине листов нижнего пояса стенки 20 мм и менее;

б) при толщине листов нижнего пояса стенки более 20 мм

Рис.4.5 – Соединения днища со стенкой

5 КОМПОНОВКА РЕЗЕРВУАРОВ

Компоновка стенки резервуара сводится к выбору:

- размеров применяемых листов;
- типа соединений поясов (встык, телескопическое, ступенчатое);
- метода монтажа;
- расположение поясов относительно друг друга (со смещением или без смещения).

Компоновка днища резервуара состоит из:

- выбора фундамента;
- выбора метода монтажа днища (рулонное или листовое);
- определения наличия окраек;
- назначения толщин центральной части днища и окраек;
- выбора размеров применяемых листов;
- раскладки листов днища.

При компоновке кровли устанавливаются и выбираются:

- тип кровли;
- количество щитов;
- высота покрытия в центре;
- геометрические параметры кровли (ширина щита у стенки, расстояние между поперечными рёбрами, диаметр верхнего опорного кольца и др.).

Теоретически резервуар заданной ёмкости можно выполнить в нескольких вариантах, изменяя его диаметр и высоту.

Основные размеры резервуаров рекомендуется принимать:

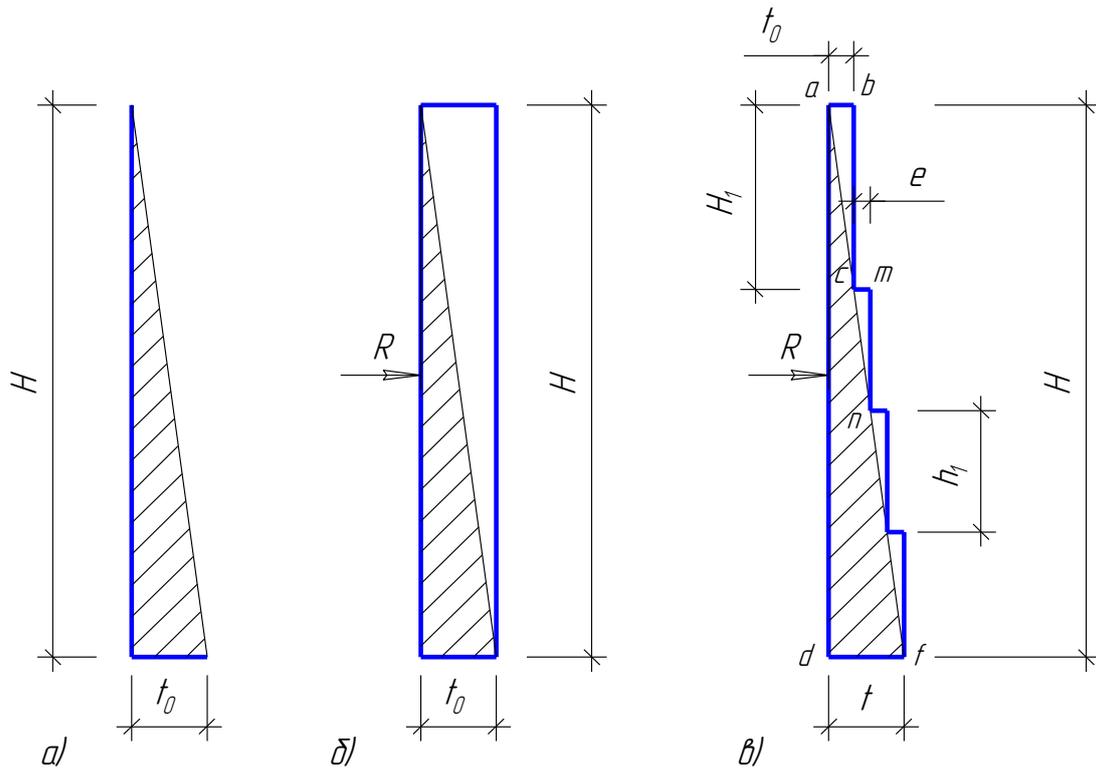
- по требованию заказчика;
- из условий компоновки резервуаров на площадке строительства;
- из условия минимума веса корпуса с учётом эксплуатационных требований по диаметру и высоте стенки.

Из всех возможных геометрических параметров резервуаров одной и той же ёмкости один резервуар по сумме затрат всегда будет наиболее дешёвым в сооружении и эксплуатации, чем группа резервуаров. Экономичные или оптимальные размеры резервуара зависят не только от расхода металла и расчётных нагрузок, но и от величины потерь светлых нефтепродуктов от испарения, от площади занимаемого участка земли, от теплотерь резервуаров и т.п. Первые два фактора требуют увеличения, а последний уменьшения высоты резервуара.

Определение размеров резервуаров с учётом всех указанных факторов чрезвычайно сложно, так как стоимости монтажа и эксплуатации резервуара являются сложными функциями высоты и диаметра. Поэтому экономику основных размеров резервуаров обычно рассматривают с точки зрения затраты металла. Впервые решение этой проблемы было дано акад. В. Г. Шуховым в 1883 г. Классическое решение В. Г. Шухова до настоящего времени применяется в резервуаростроении без существенных изменений как в нашей стране, так и за рубежом. Формулы В. Г. Шухова применимы для резервуаров, изготовленных из одной марки стали, у которых все толщины поясов определены из условия прочности, а избыточное давление не превышает 1 кПа.

5.1 Определение оптимальных геометрических параметров для резервуаров с постоянной толщиной стенки

Рассмотрим определение оптимальных размеров для резервуара заданного объёма V с толщиной листов покрытия и днища t_k и $t_{дн}$ соответственно, для которого необходимо определить высоту H и радиус R (рис. 5.1, б).



а) теоретическая; б) для резервуаров с постоянной толщиной стенки; в) для резервуаров с переменной толщиной стенки

Рис.5.1 – Эпюры толщин стенки

Общий объём металла Q , необходимого для строительства резервуара, складывается из:

1) объёма металла днища и покрытия

$$q_1 = \pi R^2 (t_k + t_{\text{дн}}) = \pi R^2 \lambda, \quad (5.1)$$

где $R = r$ – радиус срединной поверхности;

$\lambda = t_k + t_{\text{дн}}$ – суммарная приведённая толщина днища и кровли резервуара. Значение суммарной приведённой толщины днища и кровли резервуара может быть принято по табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Суммарная приведённая толщина днища и кровли резервуаров

$V, \text{ м}^3$	1000	2000	3000	4000	5000	8000	10000	12000	16000	20000
$\lambda, \text{ см}$	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8

2) объёма металла стенки

$$q_2 = 2\pi RHt_0, \quad (5.2)$$

$$Q = \pi R^2 \lambda + 2\pi RHt_0. \quad (5.3)$$

Подставляя в уравнение (5.3) значение $R = \sqrt{\frac{V}{\pi H}}$, получим

$$Q = V \frac{\lambda}{H} + 2t_0 \sqrt{V \cdot \pi \cdot H}. \quad (5.4)$$

Минимальный объём металла, затрачиваемого на резервуар, найдём из

условия $\frac{dQ}{dH} = 0$:

$$-V \frac{\lambda}{H^2} + t_0 \sqrt{\frac{V \cdot \pi}{H}} = 0 \quad \text{или} \quad V \frac{\lambda}{H} = t_0 \sqrt{V \cdot \pi \cdot H}. \quad (5.5)$$

В последнем уравнении $V \frac{\lambda}{H}$ – объём металла днища и покрытия, а $t_0 \sqrt{V \cdot \pi \cdot H}$ – половина объёма металла, идущего на стенку резервуара. Отсюда следует, что резервуар с постоянной толщиной стенки имеет наименьшую массу металла в том случае, когда масса днища и стенки в два раза меньше массы стенки.

Решая уравнение (5.5) относительно H , найдём высоту резервуара, отвечающую минимальной затрате металла:

$$H = \sqrt[3]{\frac{V \cdot \lambda^2}{\pi \cdot t_0^2}}. \quad (5.6)$$

Подставляя в выражение $V = \pi R^2 H$ значение H из уравнения (5.6), найдём радиус экономически целесообразного (с точки зрения затраты металла) резервуара:

$$R = \frac{\sqrt{V}}{\sqrt{\pi \cdot 3 \sqrt{\frac{V \cdot \lambda^2}{\pi \cdot t_0^2}}}} = \sqrt[3]{\frac{V \cdot t_0}{\pi \cdot \lambda}}. \quad (5.7)$$

Отсюда отношение

$$\frac{H}{R} = \frac{\sqrt[3]{\frac{V \cdot \lambda^2}{\pi \cdot t_0^2}}}{\sqrt[3]{\frac{V \cdot t_0}{\pi \cdot \lambda}}} = \frac{\lambda}{t_0}. \quad (5.8)$$

Для определения минимального объёма металла, вложенного в резервуар, в уравнении (5.4) заменим H его значением из (5.6):

$$Q_{\text{мин}} = V \frac{\lambda}{\sqrt[3]{\frac{V \cdot \lambda^2}{\pi \cdot t_0^2}}} + 2t_0 \sqrt{V \pi 3 \sqrt{\frac{V \lambda^2}{\pi t_0^2}}} = 3 \sqrt[3]{\pi \lambda t_0^2 V^2}. \quad (5.9)$$

Резервуары с постоянной толщиной стенки ($t_0 = \text{const}$) мало экономичны, так как металл стенок в них полностью не используется. Поэтому в случае необходимости объём их может быть увеличен путём наращивания поясов. Предельная высота H_x , до которого можно нарастить резервуары с $t_0 = \text{const}$, определится из формулы

$$t_0 = \frac{h \cdot R \cdot \rho}{R_y} = \frac{h \cdot R}{\alpha}, \quad (5.10)$$

где h – высота залива продукта относительно рассматриваемого сечения резервуара, R – радиус резервуара, ρ – плотность нефтепродуктов, R_y – расчётное сопротивление стали по пределу текучести, $\alpha = R_y / \rho$.

В этом случае

$$H_x = \frac{t_0 \cdot \alpha}{R}. \quad (5.11)$$

Тогда максимальное увеличение объёма резервуара при наращивании

$$\Delta V = \pi R^2 (H_x - H) = \pi R^2 \left(\frac{t_0 \cdot \alpha}{R} - H \right) = V \left(\frac{t_0 \cdot \alpha}{R \cdot H} - 1 \right), \quad (5.12)$$

где V и H – объём и высота резервуара до наращивания.

5.2 Определение оптимальных геометрических параметров для резервуаров с переменной толщиной стенки

Для определения оптимальных геометрических параметров для резервуара с переменной толщиной стенки, в дополнение к обозначениям, приведённым выше, введём следующие: t – толщина листов нижнего пояса; H_1 – высота верхних поясов с одинаковой толщиной стенки; e – разность толщин листов двух смежных поясов, $e = \text{const}$; h_1 – высота одного пояса (рис. 5.1, в).

Объём металла всего резервуара включает в себя следующие объёмы:

1) объём металла днища и покрытия

$$q_1 = V \frac{\lambda}{H}. \quad (5.13)$$

2) объём рабочего металла стенки, необходимого для восприятия усилий, возникающих от гидростатического давления нефтепродукта. Этот объём равен объёму тороида с треугольным поперечным сечением (см. заштрихованную площадь на рис. 5.1, в):

$$q_2 = 2\pi R \frac{H \cdot t}{2} = \pi R H t. \quad (5.14)$$

Подставляя значение t из уравнения (5.10) с учётом, что $\pi R^2 H = V$, окончательно получим

$$q_2 = \pi R H \frac{HR}{\alpha} = V \frac{H}{\alpha}. \quad (5.15)$$

3) объём металла, бесполезно затрачиваемого в верхних поясах (соответствует объёму тороида с поперечным сечением abc):

$$q_3 = 2\pi R \frac{H_1 t_0}{2} = \pi R H_1 t_0. \quad (5.16)$$

Из уравнения (5.10) находим H_1 :

$$H_1 = \frac{t_0 \alpha}{R}. \quad (5.17)$$

$$q_3 = \pi R \frac{t_0 \alpha}{R} t_0 = \pi \alpha t_0^2. \quad (5.18)$$

4) объём металла, бесполезно затрачиваемого в нижних поясах переменного сечения (соответствует сумме объёмов тороидов с треугольным поперечным сечением stm). Так как число нижних поясов переменного сечения равно $\frac{H - H_1}{h_1}$, то

$$q_4 = 2\pi R \frac{H - H_1}{h_1} \cdot \frac{h_1 \cdot e}{2} = \pi R (H - H_1) e. \quad (5.19)$$

Из подобия треугольников adf и stm $\frac{e}{t} = \frac{e_1}{H}$, откуда

$$e = t \frac{h_1}{H} = \frac{HR}{\alpha} \cdot \frac{h_1}{H} = \frac{h_1 R}{\alpha}. \quad (5.20)$$

Имея в виду, что $\pi R^2 H = V$ и $H_1 = \frac{t_0 \alpha}{R}$, получим

$$q_4 = \pi R(H - H_1)e = \pi R H \frac{h_1 R}{\alpha} - \pi R H_1 \frac{h_1 R}{\alpha} = V \frac{h_1}{\alpha} - t_0 h_1 \sqrt{\frac{\pi V}{H}}, \quad (5.21)$$

$$Q = \sum_1^4 q_i = V \frac{\lambda}{H} + V \frac{H}{\alpha} + \pi \cdot \alpha \cdot t_0^2 + V \frac{h_1}{\alpha} - t_0 h_1 \sqrt{\frac{\pi V}{H}}. \quad (5.22)$$

Экономически целесообразную (с точки зрения затраты металла) высоту резервуара найдём из условия $\frac{dQ}{dH} = 0$:

$$-V \frac{\lambda}{H^2} + V \frac{1}{\alpha} + \frac{t_0 h_1}{2H} \sqrt{\frac{\pi V}{H}} = 0. \quad (5.23)$$

Из последнего уравнения H находится методом последовательных приближений.

Для резервуаров большой ёмкости последним членом формулы (5.22) $-t_0 h_1 \sqrt{\frac{\pi V}{H}}$ вследствие малости можно пренебречь; тогда вместо (5.22) будем иметь:

$$Q = \sum_1^4 q_i = V \frac{\lambda}{H} + V \frac{H}{\alpha} + \pi \cdot \alpha \cdot t_0^2 + V \frac{h_1}{\alpha}, \quad (5.24)$$

$$\frac{dQ}{dH} = -V \frac{\lambda}{H^2} + V \frac{1}{\alpha} = 0, \quad (5.25)$$

$$V \frac{\lambda}{H} = V \frac{H}{\alpha}. \quad (5.26)$$

В последнем уравнении $V \frac{\lambda}{H}$ – объём металла днища и покрытия, а $V \frac{H}{\alpha}$ – объём рабочего металла, необходимого для восприятия гидростатической нагрузки.

Таким образом, резервуар с переменной толщиной стенки имеет наименьшую массу, когда масса металла днища и покрытия равна массе рабочего металла.

Решая уравнение (5.26) относительно H , найдём

$$H = \sqrt{\alpha \cdot \lambda} \text{ или } H = \sqrt{\frac{R_y \lambda}{\rho}}. \quad (5.27)$$

Уравнение (5.27) позволяет сделать два весьма важных заключения:

- 1) высота резервуаров с переменной толщиной стенок не зависит от объёма резервуара (если $\lambda = \text{const}$);
- 2) высота резервуаров с переменной толщиной стенок определяется конструктивными (нерасчётными) элементами резервуара – толщиной листов днища и покрытия.

Минимальный объём металла, вложенного в резервуар, получим, подставив в уравнение (5.24) значение H из (5.27):

$$Q_{\text{мин}} = V \frac{\lambda}{\sqrt{\alpha \lambda}} + V \frac{\sqrt{\alpha \lambda}}{\alpha} + \pi t_0^2 + V \frac{h_1}{\alpha} = V \left[2 \sqrt{\frac{\lambda}{\alpha}} + \frac{h_1}{\alpha} \right] + \pi t_0^2 \alpha. \quad (5.28)$$

Фактический объём металла будет на несколько процентов больше (обычно 5÷7%), чем по (5.9) и (5.28), вследствие округления расчётных толщин листов пояса до стандартных и отходов при обрезке листов.

Из уравнения (5.28) следует, что один резервуар заданной ёмкости V всегда выгоднее по массе, чем равновеликая ему по ёмкости группа малых резервуаров. Это следует из того, что в каждом резервуаре независимо от

объёма непроизводительно расходуется одно и то же количество нерабочего металла в верхних поясах $\pi t_0^2 \alpha$.

Максимальный объём резервуаров с постоянной толщиной стенки $V_{\text{макс}}^{t=\text{const}}$ отвечает тому случаю, когда нижний пояс корпуса работает с расчётным напряжением. К такому «предельному» резервуару в одинаковой степени применимы формулы для резервуаров с $t = \text{const}$ и $t \neq \text{const}$.

Предельный объём резервуаров $V_{\text{макс}}^{t=\text{const}}$ найдём из выражения $V = \pi R^2 H$. Подставив в него значение R из (5.8) и H из (5.27), получим

$$V_{\text{макс}}^{t=\text{const}} = \pi H H^2 \frac{t_0^2}{\lambda^2} = \pi \alpha \lambda \sqrt{\alpha \lambda} \frac{t_0^2}{\lambda^2} = \pi t_0^2 \alpha \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda}}. \quad (5.29)$$

Все резервуары, имеющие объём больше $V_{\text{макс}}^{t=\text{const}}$, строят с переменной толщиной стенки.

Следует отметить, что строительная высота резервуара отличается от расчётной, так как во избежание больших отходов металла она принимается кратной ширине (высоте) листов h_1 . Отклонение строительной высоты резервуара от расчётной до 10% практически не отражается на экономичности конструкции.

Структура полученных формул для минимального объёма металла (5.9) и (5.28) свидетельствует о том, что расход металла на единицу объёма резервуара q_0 уменьшается с увеличением ёмкости резервуара. Разделив $Q_{\text{мин}}$ в (5.9) и (5.28) на V , получим

$$\text{для резервуара с постоянной толщиной стенки: } q_0 = 3\sqrt[3]{\frac{\pi \lambda t_0^2}{V}}; \quad (5.30)$$

$$\text{для резервуара с переменной толщиной стенки: } q_0 = 2\sqrt{\frac{\lambda}{\alpha}} + \frac{h_1}{\alpha} + \frac{\pi t_0^2 \alpha}{V}. \quad (5.31)$$

Отсюда следует, что с увеличением ёмкости сильно сокращается расход металла на единицу объёма у резервуаров с постоянной толщиной стенки и менее значительно у резервуаров с переменной толщиной стенки. Таким образом, резервуар тем выгоднее, чем больше его объём.

5.3 Определение генеральных размеров резервуара

Полученное по формулам (5.6) и (5.27) значение высоты стенки резервуара должно быть откорректировано с учётом ширины листовой стали (с учётом острожки при стыковом соединении).

Принимая во внимание изготовление методом рулонирования, высоту резервуаров принимают с учётом размеров станков для изготовления рулонов.

Длина окружности корпуса стенки определяется по формуле:

$$L^* = 2\pi\sqrt{\frac{V}{\pi \cdot H}}, \quad (5.32)$$

где H – высота налива продукта. Для резервуаров до 5000 м^3 она равна полной высоте стенки; для резервуаров свыше 5000 м^3 – 95% высоты стенки.

Длина полотнища стенки L должна быть кратна длине листа с учётом острожки кромок (обычно принимаются листы длиной 5990 мм). При необходимости добавляется вставка $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{4}$ длины листа. При рулонном методе монтажа нужно учесть нахлёстку в каждом вертикальном монтажном стыке полотнищ, принимаемую равной 200 мм, тогда длина полотнища стенки может быть определена по формуле (5.33). Нахлёстка облегчает достижение плавности круговой формы стенки, на монтаже нахлёстка обрезается для сварки встык.

$$L = L^* + 2 \times 100 \text{ мм}. \quad (5.33)$$

Внутренний радиус оболочки определяется по формуле:

$$r_{\text{вн}} = \frac{L}{2\pi}. \quad (5.34)$$

Типовой геометрический ряд резервуаров приведён в Приложении А [1]. Рекомендуемые размеры резервуаров со стационарной крышей указаны в табл. 5.2.

Таблица 5.2 – Рекомендуемые геометрические размеры резервуаров

Номинальный объём $V, \text{ м}^3$	Внутренний диаметр $D_{\text{вн}}, \text{ м}$	Высота стенки $H_{\text{ст}}, \text{ м}$
100	4,73	6,0
200	6,63	
300	7,58	7,5
400	8,53	
700	10,43	9,0
1000		12,0
2000	15,18	
3000	18,98	
5000	22,8	
	20,92	15,0
10000	28,5	18,0
	34,2	12,0
20000	39,9	18,0
	47,4	12,0

В результате компоновки стенки и определения генеральных размеров резервуара выполняется чертёж развёртки стенки вертикального цилиндрического резервуара.

6 РАСЧЁТ КОНСТРУКЦИЙ РЕЗЕРВУАРА

Расчёт конструкций резервуаров выполняют по предельным состояниям в соответствии с [1, 2, 5, 15].

При возведении и эксплуатации на конструкции резервуара действуют постоянные и временные (длительные, кратковременные, особые) нагрузки.

К постоянным нагрузкам относят нагрузки от собственного веса элементов конструкций резервуаров.

К временным длительным нагрузкам относят:

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

К временным кратковременным нагрузкам относят:

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

К особым нагрузкам относят:

- сейсмические воздействия;
- аварийные нагрузки, связанные с нарушением технологического процесса;

- воздействия от деформаций основания, сопровождающиеся коренным изменением структуры грунта.

При определении нагрузки от собственного веса элементов конструкций резервуара следует использовать значения номинальной толщины элементов. При проверке несущей способности указанных элементов конструкций резервуара используют значения расчётной толщины элементов.

Значения коэффициентов надёжности по нагрузкам следует принимать в соответствии с [5] и [14].

Класс опасности резервуаров учитывается коэффициентом надёжности (см. п. 2.1)

6.1 Расчёт стенки

Проверка несущей способности стенки резервуара должна включать в себя:

- расчёт прочности при статическом нагружении в условиях эксплуатации и гидроиспытаний;
- проверка устойчивости при статическом нагружении;
- проверка прочности и устойчивости при сейсмических воздействиях (в сейсмоопасных районах);
- расчёт малоциклового прочностного ресурса (при необходимости определения срока службы резервуара).

Основной нагрузкой при расчёте стенки на прочность является гидростатическое давление, которое, совместно с избыточным давлением, вызывает появление в стенке кольцевых растягивающих напряжений. Таким образом, при определении кольцевых напряжений рассматривают следующие загрузки:

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

$$P_{\text{ж}} = \gamma_{f_{\text{ж}}} \cdot g \cdot \rho \cdot (H - z), \quad (6.1)$$

где $\gamma_{f_{\text{ж}}}$ – коэффициент надёжности по нагрузке, принимаемый для гидростатического давления равным 1;

z – расстояние от дна до нижней кромки расчётного пояса.

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

Значение плотности для разного вида жидкостей приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Плотность некоторых жидкостей

Наименование продукта	Вода	Нефть	Керосин	Мазут	Бензин
Плотность, кг/м ³	1000	820-950	780-850	960-970	700-780

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

$$P_{\text{и}} = \gamma_{f_{\text{и}}} \cdot P_{\text{ин}}, \quad (6.2)$$

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

$P_{\text{ин}}$ – 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 $G_{\text{о}}$ (кН):

$$G_{\text{о}} = \gamma_{f_g} \cdot G_{\text{он}} \cdot \pi \cdot r^2, \quad (6.3)$$

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

G_{On} – нормативное значение распределённой нагрузки от веса покрытия, площадок ограждения и стационарного оборудования, приближенно может быть определено по обобщенным показателям [9] в зависимости от объёма резервуара (табл. 6.2).

Таблица 6.2 – Вес покрытия, площадок ограждения и оборудования

Объём резервуара $V, \text{ м}^3$	1000	5000	10000	20000
Вес крыши и оборудования, $G_{On}, \text{ кН/м}^2$	0,3	0,35	0,45	0,55

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

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

$$G_M = \gamma_{fg} \cdot 2\pi \cdot r \cdot \rho_M \cdot g \cdot H_{ст,i} \cdot t_i, \quad (6.4)$$

где 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:

$$G_Y = \gamma_{fY} \cdot G_{Yn} \cdot S_{пов} + \gamma_{fY} \cdot G_{Yn} \cdot 2\pi \cdot r \cdot H_{ст,i}, \quad (6.5)$$

где γ_{fY} – коэффициент надёжности 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 кровли:

для сферической $S_{\text{пов}} = 2\pi \cdot R_{\text{пов}} \cdot h_{\text{кр}}$;

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:

$$G_Y = \gamma_{fY} \cdot G_{Yn} \cdot (S_{\text{пов}} + 2\pi \cdot r \cdot H_{\text{ст},i}) + \gamma_{fg_{3к}} \cdot \rho_{3к} \cdot g \cdot 2\pi \cdot r \cdot H_{\text{ст},i} \cdot t_{3к}, \quad (6.6)$$

где $\rho_{3к}$ – плотность материала защитного кожуха;

$t_{3к}$ – толщина стенки защитного кожуха;

$\gamma_{fg_{3к}}$ – коэффициент надёжности для собственного веса защитного кожуха, принимаемый равным: для оцинкованной стали – 1,05, для защиты из полимерных материалов – 1,2.

г) вес снега S (кН/м²):

$$S = S_g \cdot \mu, \quad (6.7)$$

где S_g – расчётное значение веса снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли (по п. 5.2. [5]);

μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие (по п. 5.3.-5.6. [5]).

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):

$$P_{\text{вак}} = \gamma_{f \text{ вак}} \cdot P_{\text{вак } n}, \quad (6.8)$$

где $\gamma_{f \text{ вак}}$ – коэффициент надёжности по нагрузке для вакуума, принимаемый равным 1,2;

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

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

$$P_{\text{вет}} = \gamma_{f \text{ вет}} \cdot w_0 \cdot k \cdot c, \quad (6.9)$$

где $\gamma_{f \text{ вет}}$ – коэффициент надёжности по нагрузке для ветровой нагрузки, принимаемый при расчете на устойчивость равным 0,5 [14];

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

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

c – аэродинамический коэффициент (по п. 6.6. [5], прил. 4), равный 1 при $\beta = 0$.

6.1.1 Предварительный выбор толщин поясов стенки

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

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

$$t_e = \frac{g \cdot \rho \cdot (H - z) \cdot r}{R_y \cdot \gamma_c}, \quad (6.10)$$

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

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

$$t_g = \frac{g \cdot \rho_B \cdot (H_g - z) \cdot r}{R_y \cdot \gamma_c}, \quad (6.11)$$

где ρ_B – плотность используемой при гидроиспытаниях воды;

H_g – высота налива воды при гидроиспытаниях;

$\gamma_c = 0,9$ – коэффициент условий работы при гидроиспытаниях для всех поясов одинаков.

По конструктивным требованиям толщина t_k определяется по табл. 6.3 (табл. 3.3 [1]).

Таблица 6.3 – 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:

$$t - \Delta \geq \max(t_e + c, t_g, t_k), \quad (6.12)$$

где Δ – минусовой допуск на прокат (п. 2.3.1. – п. 2.3.3. [1]);

c – припуск на коррозию.

Величина припуска на коррозию задаётся заказчиком и зависит от агрессивности хранимого в резервуаре продукта и нормативного срока его эксплуатации. Так, например, для среднеагрессивной среды со средней скоростью коррозии металла до 0,05 мм/год и нормативным сроком эксплуатации 20 лет величина припуска на коррозию определится и составит $0,05 \times 20 = 1$ мм.

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

$$t_p = t - \Delta - c. \quad (6.13)$$

6.1.2 Проверка стенки на прочность

Проверка прочности стенки выполняется по приведённым и по кольцевым напряжениям (п. 3.5.4. [1]):

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}, \quad (6.14)$$

$$\sigma_2 \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}, \quad (6.15)$$

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

Кольцевые напряжения σ_2 вычисляются для нижних точек поясов по формуле (п. 3.5.4.1. [1]):

$$\sigma_2 = \frac{(g \cdot \rho \cdot (H - z) + 1,2 \cdot P_{ин}) \cdot r}{t_p} = \frac{(P_{ж} + P_{и}) \cdot r}{t_p}. \quad (6.16)$$

Меридиональные напряжения σ_1 , с учётом коэффициентов надёжности по нагрузке и коэффициентов для основного сочетания нагрузок вычисляются для нижних точек поясов по формуле (п. 3.5.4.2. [1]):

$$\sigma_1 = \frac{G_M + 0,95(G_O + G_Y)}{2\pi \cdot r \cdot t_p} + \frac{(0,9 \cdot S - 0,95 \cdot P_{и}) \cdot r}{2 \cdot t_p}, \quad (6.17)$$

где 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).

6.1.3 Расчёт узла сопряжения стенки с днищем

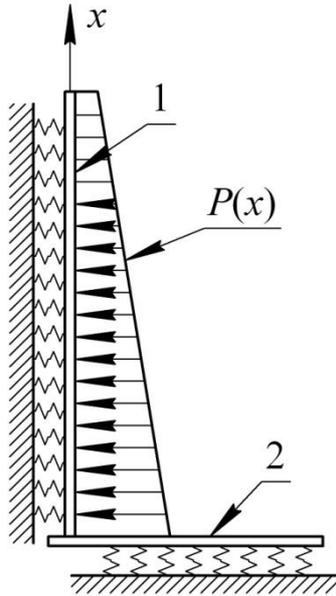
В узле сопряжения стенки и днища (зона уторного шва) возникает краевой эффект, и, кроме меридиональных и кольцевых усилий, появляется еще изгиб оболочек, от изгибающих моментов, поперечных сил и дополнительных меридиональных и кольцевых усилий.

Методика расчёта уторного узла базируется на способе, разработанном М. К. Сафаряном и М. Н. Ручимским [16]. В основу расчёта положено следующее соображение. Если нагрузка, действующая на стенку резервуара, осесимметрична, то изгиб стенки может быть выражен дифференциальным уравнением, аналогичным дифференциальному уравнению изгиба балки на упругом основании (в смысле гипотезы коэффициента постели) (рис. 6.1).

Под воздействием внешних нагрузок в нижнем узле возникают изгибающий момент и поперечная сила, т.е. задача является дважды статически неопределимой. Неизвестные изгибающий момент $M_0 (X_1)$ и поперечная сила $Q_0 (X_2)$ (рис. 6.2) могут быть получены решением системы канонических уравнений метода сил:

$$\begin{cases} \delta_{11} \cdot X_1 + \delta_{12} \cdot X_2 + \Delta_{1p} = 0; \\ \delta_{21} \cdot X_1 + \delta_{22} \cdot X_2 + \Delta_{2p} = 0. \end{cases} \quad (6.18)$$

где δ_{11} , $\delta_{12} = \delta_{21}$, δ_{22} – единичные перемещения от $X_1 = 1$ и $X_2 = 1$; Δ_{1p} и Δ_{2p} – грузовые члены, зависящие от внешней нагрузки.



1 – стенка резервуара; 2 – днище

Рис.6.1 – Расчетная схема нижнего узла резервуара

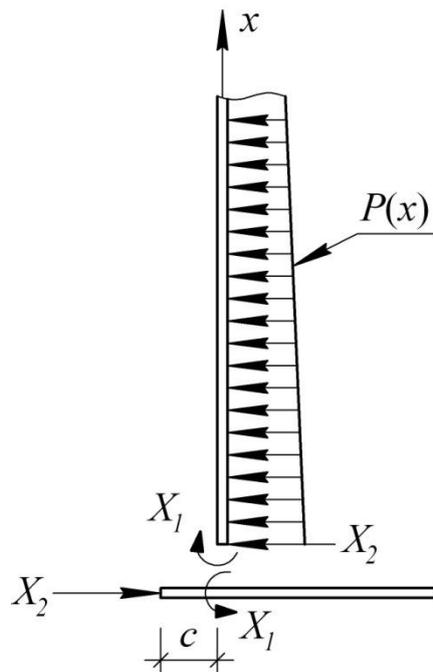


Рис.6.2 – Основная система. Усилия, действующие на нижний узел резервуара

При этом каждое единичное перемещение и перемещение от внешней нагрузки состоит из двух слагаемых – от перемещений стенки и днища:

$$\delta_{11} = \delta_{11}^{\text{CT}} + \delta_{11}^{\text{ДН}}; \quad (6.19)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \delta_{12}^{\text{CT}} + \delta_{12}^{\text{ДН}} = \delta_{21}^{\text{CT}} + \delta_{21}^{\text{ДН}}; \quad (6.20)$$

$$\delta_{22} = \delta_{22}^{\text{CT}} + \delta_{22}^{\text{ДН}}; \quad (6.21)$$

$$\Delta_{1p} = \Delta_{1p}^{\text{CT}} + \Delta_{1p}^{\text{ДН}}; \quad (6.22)$$

$$\Delta_{2p} = \Delta_{2p}^{\text{CT}} + \Delta_{2p}^{\text{ДН}}. \quad (6.23)$$

Считая днище абсолютно жестким на растяжение и учитывая, что от действия момента и внешней нагрузки днище не деформируется в горизонтальном направлении, получим

$$\delta_{12}^{\text{ДН}} = \delta_{21}^{\text{ДН}} = \delta_{22}^{\text{ДН}} = \Delta_{2p}^{\text{ДН}} = 0. \quad (6.24)$$

Тогда система уравнений (6.18) принимает форму:

$$\begin{cases} (\delta_{11}^{\text{CT}} + \delta_{11}^{\text{ДН}}) \cdot X_1 + \delta_{12}^{\text{CT}} \cdot X_2 + \Delta_{1p}^{\text{CT}} + \Delta_{1p}^{\text{ДН}} = 0; \\ \delta_{21}^{\text{CT}} \cdot X_1 + \delta_{22}^{\text{CT}} \cdot X_2 + \Delta_{2p}^{\text{CT}} = 0. \end{cases} \quad (6.25)$$

На основании решения дифференциального уравнения изогнутой оси балки на упругом основании [16] получены формулы для единичных перемещений и перемещений от внешней нагрузки (6.26)-(6.34):

$$\delta_{11}^{\text{CT}} = \frac{1}{m_{\text{CT}} \cdot D_{\text{CT}}}; \quad (6.26)$$

$$\delta_{11}^{\text{ДН}} = \frac{1}{m_{\text{ДН}} D_{\text{ДН}}} \frac{1 + \varphi_{m_{\text{ДН}}^2}^2 + 2\theta_{m_{\text{ДН}}^2}^2}{4}; \quad (6.27)$$

$$\delta_{12}^{ст} = \delta_{21}^{ст} = \frac{1}{2m_{ст}^2 \cdot D_{ст}}; \quad (6.28)$$

$$\Delta_{1p}^{ст} = \frac{\gamma}{k_{ст}}; \quad (6.29)$$

$$\Delta_{1p}^{дн} = \Delta_{1q1}^{дн} + \Delta_{1q0}^{дн}; \quad (6.30)$$

$$\Delta_{1q1}^{дн} = -\frac{q_1}{2m_{дн}^2 D_{дн}} \theta_{m_{дн}c}^2; \quad (6.31)$$

$$\Delta_{1q0}^{дн} = -\frac{q_0 m_{дн}}{2k_{дн}} (1 - \varphi_{m_{дн}c} \psi_{m_{дн}c} + 2\theta_{m_{дн}c} \xi_{m_{дн}c}); \quad (6.32)$$

$$\delta_{22}^{ст} = \frac{1}{2m_{ст}^3 \cdot D_{ст}}; \quad (6.33)$$

$$\Delta_{2p}^{ст} = \frac{\rho \cdot g}{k_{ст}} H. \quad (6.34)$$

В формулах (6.26)-(6.34) приняты следующие обозначения величин и сокращения:

q_1 – равномерно распределенная погонная нагрузка, приходящаяся на 1 см периметра корпуса от собственного веса покрытия и корпуса (кН/см);

q_0 – равномерно распределенное гидростатическое давление;

$D_{ст}$ – цилиндрическая жесткость стенки:

$$D_{ст} = \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \mu^2)}; \quad (6.35)$$

$k_{ст}$ – коэффициент постели стенки:

$$k_{ст} = \frac{E \cdot t}{r^2}; \quad (6.36)$$

$m_{ст}$ – коэффициент деформации стенки:

$$m_{ст} = 4 \sqrt[4]{\frac{k_{ст}}{4D_{ст}}}; \quad (6.37)$$

$D_{дн}$ – цилиндрическая жесткость днища:

$$D_{дн} = \frac{E \cdot t_{дн}^3}{12(1 - \mu^2)}; \quad (6.38)$$

$m_{дн}$ – коэффициент деформации днища:

$$m_{дн} = 4 \sqrt[4]{\frac{k_{дн}}{4D_{дн}}}; \quad (6.39)$$

$k_{дн}$ – коэффициент постели основания, равный 20 кг/см³ – для искусственно уплотненного песка, 5 кг/см³ – для песка средней крупности.

$$\theta_{m_{дн}c} = e^{-m_{дн}c} \cdot \cos(m_{дн}c); \quad (6.40)$$

$$\xi_{m_{дн}c} = e^{-m_{дн}c} \cdot \sin(m_{дн}c); \quad (6.41)$$

$$\varphi_{m_{дн}c} = \theta_{m_{дн}c} + \xi_{m_{дн}c} = e^{-m_{дн}c} \cdot (\cos(m_{дн}c) + \sin(m_{дн}c)); \quad (6.42)$$

$$\psi_{m_{дн}c} = \theta_{m_{дн}c} - \xi_{m_{дн}c} = e^{-m_{дн}c} \cdot (\cos(m_{дн}c) - \sin(m_{дн}c)). \quad (6.43)$$

Момент в днище в [16] предлагается определять по формуле:

$$M_{дн} = \frac{X_1(1 + \varphi_{m_{дн}c}^2)}{2} - \frac{q_1(1 - 2\theta_{m_{дн}c}\xi_{m_{дн}c} - \varphi_{m_{дн}c}\psi_{m_{дн}c})}{4m_{дн}} - \frac{q_0}{2m_{дн}^2} \xi_{m_{дн}c}^2. \quad (6.44)$$

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:

$$\sigma_{ст} = \frac{6X_1}{t^2}, \quad (6.45)$$

$$\sigma_{дн} = \frac{6M_{дн}}{t_{дн}^2}. \quad (6.46)$$

Условия прочности:

$$\sigma_{ст} \leq R_{wy} \cdot \gamma_c, \quad (6.47)$$

$$\sigma_{дн} \leq R_y \cdot \gamma_c. \quad (6.48)$$

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 (п. 11.2* [2]):

$$\sqrt{\left(\frac{X_1}{t}\right)^2 + \left(\frac{X_2}{2}\right)^2} \leq \beta_f \cdot k_f \cdot \gamma_{wf} \cdot R_{wf}; \quad (6.49)$$

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

где 2 – учитывает два угловых шва.

6.1.4 Проверка стенки на устойчивость

Проверка устойчивости стенки резервуара осуществляется для пустого резервуара по формуле (п. 3.5.6. [1]):

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \leq 1, \quad (6.50)$$

где σ_{cr1} – меридиональные критические напряжения;

σ_{cr2} – кольцевые критические напряжения;

1 – коэффициент условия работы стенки резервуара при расчёте на устойчивость.

При невыполнении условия для обеспечения устойчивости стенки можно увеличить толщину верхних поясов или установить промежуточные кольца жёсткости, или и то и другое вместе.

6.1.4.1 Кольцевые напряжения

При расчёте на устойчивость кольцевое напряжение σ_2 в резервуарах со стационарной крышей зависит от $P_{\text{вак}}$ и эквивалентного ветрового внешнего давления $P_{\text{вет}}$ (п. 3.5.6.5. [1]):

$$\sigma_2 = \frac{(0,95 \cdot P_{\text{вак}} + 0,9 \cdot P_{\text{вет}}) \cdot r}{t_{p, \text{min}}}, \quad (6.51)$$

где 0,95 – коэффициент сочетания для временных длительных нагрузок в основном сочетании (относительное разрежение в газовом пространстве резервуара);

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

$t_{p, \text{min}}$ – расчётная толщина самого тонкого пояса.

6.1.4.2 Меридиональные напряжения

Меридиональное напряжение σ_1 вычисляется для нижней кромки участка стенки постоянной толщины по формуле (п. 3.5.6.4. [1]):

$$\sigma_1 = \frac{G_M + 0,95(G_O + G_Y)}{2\pi \cdot r \cdot t_p} + \frac{(0,9 \cdot S - 0,95 \cdot P_{\text{вак}}) \cdot r}{2 \cdot t_p}. \quad (6.52)$$

6.1.4.3 Критические напряжения

Первое (меридиональное) критическое напряжение вычисляется по формуле (п. 3.5.6.1. [1]):

$$\sigma_{cr1} = \frac{C \cdot E \cdot t_{p, min}}{r}, \quad (6.53)$$

где C – коэффициент, вычисляемый по формулам:

$$C = 0,04 + 40 \frac{t_{p, min}}{r} \quad \text{при} \quad 400 \leq \frac{r}{t_{p, min}} < 1220,$$

$$C = 0,085 - \frac{r}{t_{p, min} \cdot 10^5} \quad \text{при} \quad 1220 \leq \frac{r}{t_{p, min}} < 2500;$$

E – модуль упругости прокатной стали и стальных отливок (по табл. 63 [2]).

Второе (кольцевое) критическое напряжение вычисляется по формуле (п. 3.5.6.2. [1]):

$$\sigma_{cr2} = 0,55 \cdot E \cdot \frac{r}{H_r} \left(\frac{t_{p, min}}{r} \right)^{1,5}, \quad (6.54)$$

где H_r – редуцированная высота резервуара. Для резервуаров со стационарной крышей и с постоянной толщиной поясов стенки редуцированная высота равна полной высоте стенки резервуара $H_{ст}$, при переменной толщине поясов стенки H_r вычисляется по формуле (п. 3.5.6.3. [1]):

$$H_r = \sum h_i \cdot \left(\frac{t_{p, min}}{t_{p, i}} \right)^{2,5}, \quad (6.55)$$

где h_i – высота i -го пояса;

$t_{p, i}$ – расчётная толщина листа i -го пояса.

6.1.4.4 Промежуточные кольца жёсткости

Расчёт положения промежуточных колец выполняется по методике, описанной в п. 3.5.7. [1].

Находится значение $H_{r\ max}$, при котором выполняется условие устойчивости стенки:

$$H_{r\ max} = \frac{0,55 \cdot E \cdot r}{\sigma_2} \cdot \left(\frac{t_{p, min}}{r} \right)^{1,5} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} \right). \quad (6.56)$$

Далее последовательно суммируются приведённые высоты поясов, начиная с верхнего пояса для определения пояса, в котором сумма превышает $H_{r\ max}$. Определяется высота установки кольца над нижней кромкой:

$$h_{j1} = \frac{H_{j1} - H_{r\ max}}{\left(\frac{t_{p, min}}{t_{p, j}} \right)^{2,5}}, \quad (6.57)$$

где j – номер пояса, в котором необходима установка кольца жёсткости;

H_{j1} – приведённая высота j -го пояса;

$t_{p, j}$ – расчётная толщина листа j -го пояса.

Полученная высота кольца корректируется по конструктивным соображениям (п. 3.3).

Далее выполняется расчёт положения промежуточных колец жёсткости, при этом приведённые высоты поясов суммируются, начиная с j -го пояса.

Необходимое сечение колец жёсткости подбирается из условия восприятия изгибающего момента (п. 3.6.4. [1]):

$$M = 0,0186 \cdot 1,4 \cdot P_{вет} \cdot r^2 \cdot H_{r\ max}, \quad (6.58)$$

где 1,4 – коэффициент надёжности для ветровой нагрузки;

$P_{\text{вет}}$ – значение ветрового давления на уровне установки промежуточного кольца.

Промежуточные кольца жёсткости проверяются на прочность по формуле (28) [2]:

$$\frac{M}{W} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}, \quad (6.59)$$

где W – момент сопротивления сечения кольца. При расчёте геометрических характеристик сечения допускается включить части оболочки шириной $2\sqrt{r \cdot t_{p,i}}$ выше и ниже места приварки кольца или вычислять их относительно наружной поверхности стенки.

6.1.5 Расчёт стенки резервуара на выносливость, усталость, прочность с учётом хрупкого разрушения

Расчетные проверки на выносливость, усталость, прочность с учётом хрупкого разрушения можно считать дополнительными, применяемыми только в каких-то отдельных конкретных случаях, поскольку их результаты в значительной мере зависят от целого ряда сугубо конкретных данных (количество циклов нагружения, соответствующее тому или иному значению асимметрии цикла, общее количество циклов нагружения, климатический район строительства и др.).

В курсовом проекте «Вертикальный цилиндрический резервуар низкого давления» такие проверки допускается не выполнять.

6.1.5.1 Расчет элементов резервуара на выносливость

При большом количестве циклов загрузки и разгрузки ($n = 10^5$ и более) нефтепродукта в резервуар в его конструктивных элементах (зоны перекрещивающихся сварных швов, монтажные сварные швы, зона сопряжения стенки с днищем) могут возникать усталостные явления или, другими словами,

исчерпание прочностной выносливости. Согласно [2] проверка выносливости выполняется по формуле:

$$\sigma_{max} \leq \alpha \cdot R_v \cdot \gamma_v, \quad (6.60)$$

где σ_{max} – максимальное напряжение в рассчитываемом конструктивном элементе;

α – коэффициент, определяемый в зависимости от количества циклов нагрузка-разгрузка по формулам (116) и (117) [2];

R_v – расчетное сопротивление усталости, принимаемое в зависимости от временного сопротивления стали и группы элемента по классификации [2];

γ_v – коэффициент, принимаемый по [2] в зависимости от вида напряженного состояния и коэффициента асимметрии цикла.

При расчётах на выносливость произведение $\alpha \cdot R_v \cdot \gamma_v$ должно быть не больше R_u / γ_u (R_u – расчетное сопротивление стали по временному сопротивлению определяется по таблице [2]; $\gamma_u = 1,3$ – коэффициент надежности).

6.1.5.2 Расчёт элементов резервуара на малоцикловую усталость

При больших значениях растягивающих напряжений усталостная прочность может быть исчерпана при значительно меньшем количестве циклов нагружения, чем $n = 10^5$. В таких случаях необходимо проводить проверку малоцикловой прочности.

Проверка малоцикловой прочности выполняется по формуле [3]:

$$\sigma_{max} \leq \alpha R_v \gamma_v \left(\frac{N_6}{N} \right)^m, \quad (6.61)$$

где N – расчетное количество циклов нагружения конструктивного элемента;

$N_g = 5 \cdot 10^5$ – базовое количество циклов нагружения;

m – параметр, равный $m = m_0 \cdot c$, где m_0 – определяется по таблице 6.4, а c – по таблице 6.5.

Таблица 6.4 – Значения параметра m_0

Нормативное временное сопротивление стали R_{un} , МПа	До 390	Св.390 до 450	Св. 450 до 490	Св. 490 до 540	Св. 540 до 590	Св. 590
Параметр m_0	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26

Таблица 6.5 – Значения коэффициента c

Группа элементов по [3]	1	2	3	4	5	6	7	8
Коэффициент c	1,0	0,90	0,80	0,75	0,72	0,68	0,65	0,62

Все остальные составляющие (6.61) определяются так же, как и в (6.60).

Значение напряжения $\alpha R_v \gamma_v \left(\frac{N_g}{N} \right)^m$ должно быть не больше R_u / γ_u .

6.1.5.3 Расчёт элементов резервуара на прочность с учётом хрупкого разрушения

Резервуары относятся к конструкциям, в которых практически всегда существует опасность возникновения хрупких разрушений. Для проверки прочности с учётом хрупкого разрушения используют формулу (118) [2]:

$$\sigma_{\max} \leq \beta \frac{R_u}{\gamma_u}, \quad (6.62)$$

где σ_{\max} – наибольшее растягивающее напряжение в расчётном сечении элемента, вычисленное по сечению нетто без учёта коэффициентов динамичности и ϕ_b ;

β – коэффициент, определяемый по таблицам [2].

6.2 Расчёт стационарной щитовой кровли

Резервуары низкого давления со стационарной каркасной крышей могут иметь коническое или сферическое очертание. Кровля проектируется в виде ребристого купола, все кольцевые элементы представляют собой прогоны и рассчитываются как разрезные балки (рис. 3.11, 3.12).

Расчёту подлежат следующие элементы щита:

- настил;
- поперечные рёбра;
- радиальные рёбра;
- опорное кольцо.

6.2.1 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 (рис. 6.3) по первой комбинации определяется по формуле:

$$q_{n\downarrow} = g_{кр} + g_{у} + 0,9 \cdot (S \cdot 0,7 + P_{\text{вак}}), \quad (6.63)$$

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]);

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

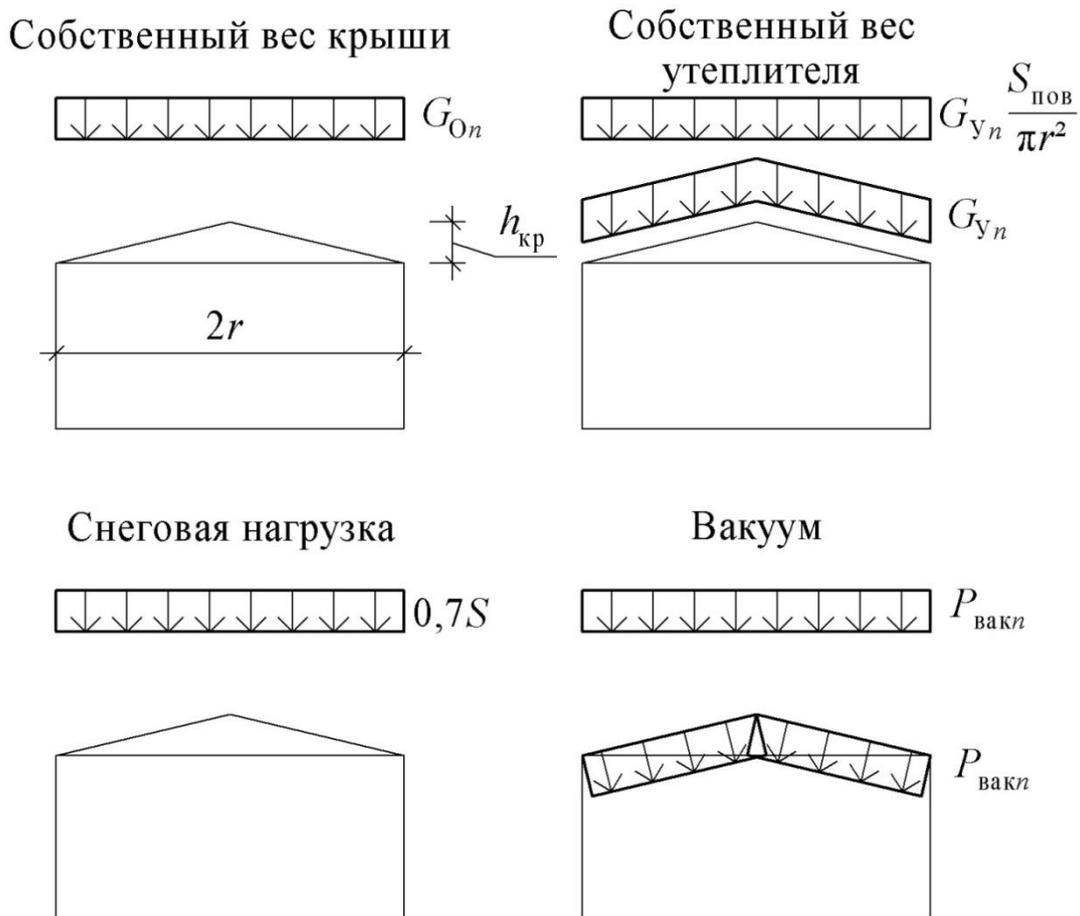


Рис.6.3 – Нормативные нагрузки, действующие на крышу «сверху вниз»

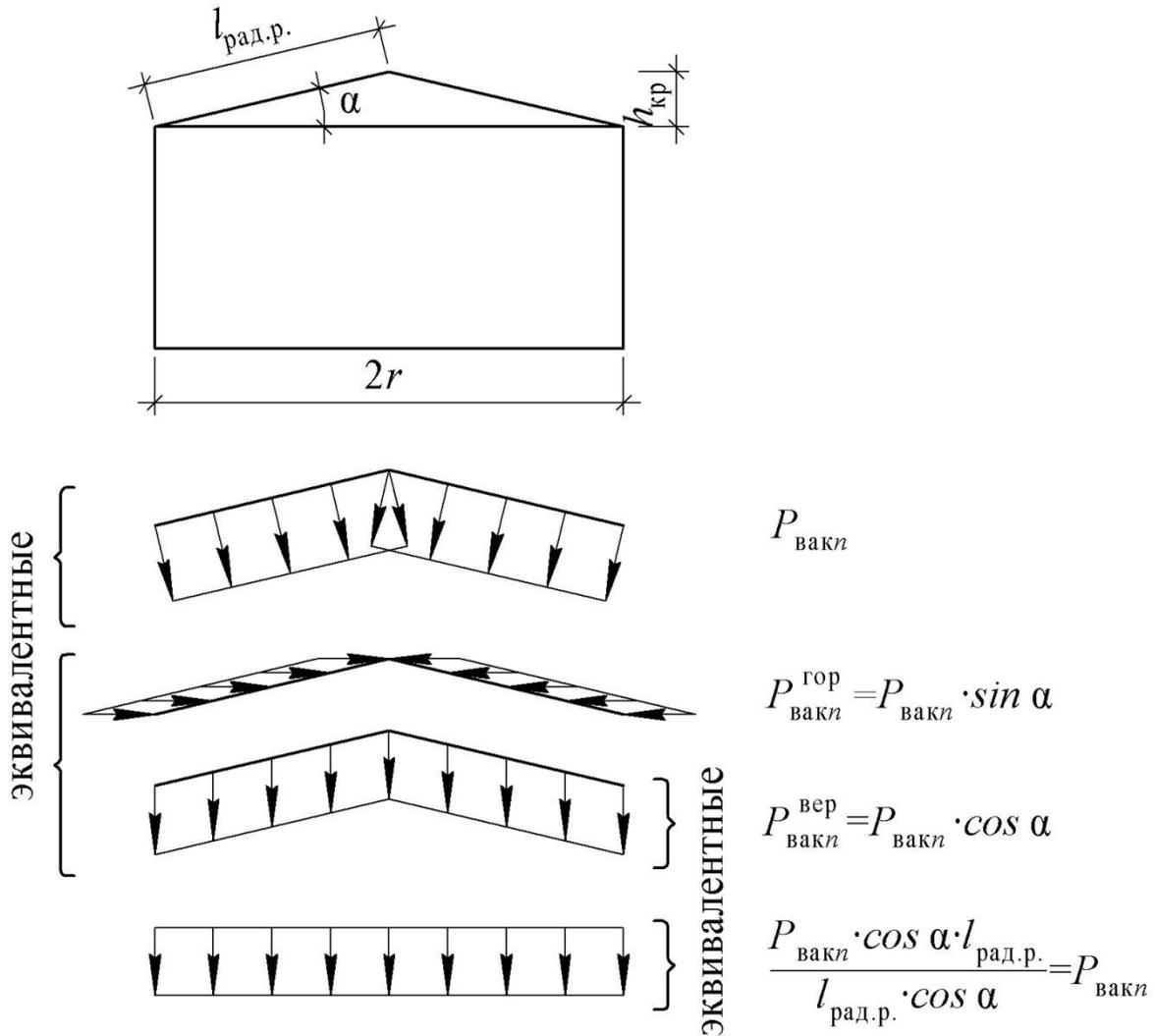


Рис.6.4 – Преобразование нагрузки от вакуума

Расчётная нагрузка по первой комбинации определяется по формуле:

$$q_{\downarrow} = G_{On} \cdot \gamma_{fg} + G_{yn} \frac{S_{\text{пов}}}{\pi \cdot r^2} \cdot \gamma_{fy} + 0,9 \cdot (S + P_{\text{вак}} \cdot \gamma_{f\text{вак}}), \quad (6.64)$$

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.

Нормативная нагрузка (рис. 6.5) по второй комбинации определяется по формуле:

$$q_{n\uparrow} = 0,9 \cdot (P_{ин} + P_{ветn}) - G_{On}, \quad (6.65)$$

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

$P_{ветn} = w_0 \cdot k \cdot c_{e2}$ – 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. Преобразование нагрузок выполняется аналогично нагрузке от вакуума (рис. 6.4).

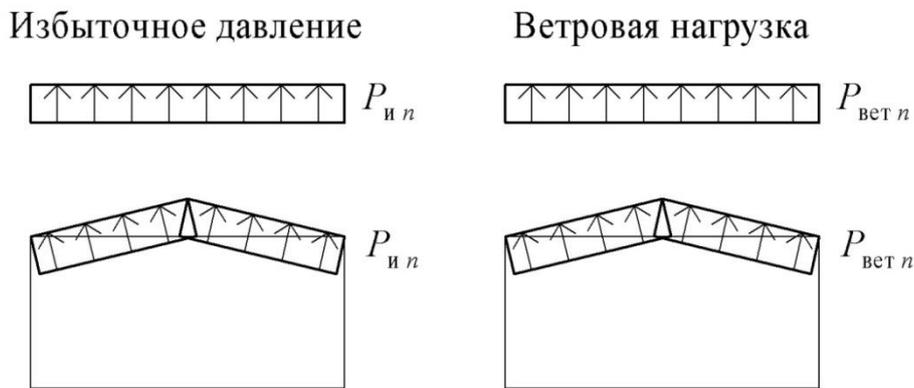


Рис.6.5 – Нормативные нагрузки, действующие на крышу «снизу вверх»

Расчётная нагрузка по второй комбинации определяется по формуле:

$$q_{\uparrow} = 0,9 \cdot (\gamma_{fи} \cdot P_{ин} + \gamma_{fвет} \cdot P_{ветn}) - G_{On} \cdot \gamma_{fg}, \quad (6.66)$$

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

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

6.2.2 Расчёт настила

Стальной настил рассчитывают как тонкую пластину с соответствующим закреплением краёв, нагруженную поперечной, равномерно распределённой нагрузкой.

В зависимости от отношения большей стороны l_1 пластины к меньшей l_2 , возможны два варианта расчёта:

- а) $\frac{l_1}{l_2} > 2$ – «длинная» пластина, опирание листов настила по двум сторонам (балочное);
- б) $\frac{l_1}{l_2} \leq 2$ – «короткая» пластина, опирание листов настила по четырём сторонам (по контуру).

6.2.2.1 Расчёт «длинных» пластин

Для «длинных» пластин можно считать, что настил работает в условиях цилиндрического изгиба только вдоль короткой стороны (σ_x).

При нагрузках, не превышающих 50 кН/м^2 , и предельном относительном прогибе не более $1/150$ прочность шарнирно закреплённого по краям стального настила всегда будет обеспечена, и его надо рассчитывать только на прогиб.

Отношение наибольшего пролёта настила к его толщине l/t можно определить по формуле, предложенной А. Л. Телояном:

$$\frac{l}{t} = \frac{4 \cdot n_0}{15} \left(1 + \frac{72 \cdot E_1}{n_0^4 \cdot q_n} \right), \quad (6.67)$$

где $n_0 = l/f = 150$ – заданное отношение пролёта настила к его предельному прогибу;

$$E_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} = \frac{2,06 \cdot 10^4}{1 - 0,3^2} = 2,26 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2;$$

$\nu = 0,3$ – коэффициент Пуассона;

q_n – нормативная нагрузка на настил.

Назначив толщину настила, можно определить расстояние между рёбрами щитов.

6.2.2.2 Расчёт «коротких» пластин

В прямоугольных «коротких» пластинах необходимо учитывать напряжения σ_x вдоль короткой стороны l_2 и напряжения σ_y вдоль длинной стороны l_1 .

При расчёте по несущей способности в упругой стадии работы материала в качестве предельной принимают нагрузку, при которой приведённые напряжения достигают R_y . Тогда условие прочности настила можно записать так:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}. \quad (6.68)$$

Максимальный прогиб и полные фибровые напряжения в центре пластины [17]:

$$f_{max} = \xi \cdot t \leq [f], \quad \sigma_x = 4k_x \cdot E \cdot \left(\frac{t}{l_2}\right)^2, \quad \sigma_y = 4k_y \cdot E \cdot \left(\frac{t}{l_1}\right)^2. \quad (6.69)$$

Мембранные напряжения посередине краёв пластины (в точках A и B , рис 6.6):

$$\sigma_{0x}^B = 4k_{0x}^B \cdot E \cdot \left(\frac{t}{l_2}\right)^2, \quad \text{при } x = \frac{l_2}{2}, y = 0; \quad (6.70)$$

$$\sigma_{0y}^A = 4k_{0y}^A \cdot E \cdot \left(\frac{t}{l_1}\right)^2, \quad \text{при } x = 0, y = \frac{l_1}{2}. \quad (6.71)$$

Коэффициенты ζ , k_x , k_y , k_{0x}^B , k_{0y}^A принимают по данным табл. 6.6 в зависимости от соотношения размеров сторон пластины $\mu = l_1 / l_2$ и значения безразмерного параметра нагрузки $\bar{g} = \frac{q \cdot l_1^4}{E \cdot t^4}$.

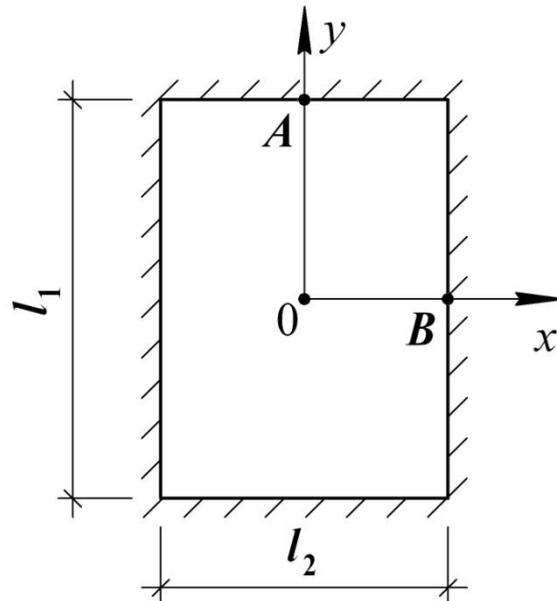


Рис.6.6 – Схема к расчёту «короткой» пластины

Таблица 6.6 – Коэффициенты для определения прогиба и напряжений в прямоугольной шарнирно закреплённой равномерно нагруженной пластине

\bar{g}	ξ	k_x	k_y	k_{0x}^B	k_{0y}^A
При $\mu = 1$					
6	0,08	0,2	0,2	0,43	0,43
13	0,17	0,45	0,45	0,96	0,96
30	0,37	1,0	1,0	2,12	2,12
65	0,70	2,0	2,0	4,44	4,44
145	1,15	3,43	3,43	8,50	8,50
335	1,7	5,37	5,37	15,20	15,20
400	2,0	6,65	6,65	19,7	19,7
	2,31	8,25	8,25	24,6	24,6
При $\mu = 1,5$					
6	0,13	0,18	0,32	0,45	0,64
13	0,29	0,40	0,71	1,01	1,49
30	0,57	1,82	1,47	2,18	3,03
65	0,97	1,46	2,63	4,35	5,87
145	1,47	2,37	4,16	7,91	10,5
215	1,75	3,0	5,13	10,2	13,8
При $\mu = 2,0$					
3,75	0,10	0,09	0,235	0,28	0,47
6,0	0,51	0,14	0,35	0,42	0,70
13,0	0,33	0,31	0,78	0,94	1,56
30	0,62	0,62	1,56	2,01	3,13
65	1,03	1,10	2,70	3,90	6,14
145	1,52	1,85	4,21	6,73	10,9

6.2.3 Расчёт поперечных рёбер

Поперечные рёбра щитов покрытия рассчитываются по схеме простых двухопорных балок, несущих равномерно распределённую нагрузку (комбинация нагрузок, действующих на крышу «сверху вниз»), собираемую с соответствующей грузовой площади (рис. 6.7). Расчётная схема поперечных рёбер показана на рис. 6.8.

Сечение поперечных рёбер принимается, как правило, из прокатных швеллеров или уголков.

Сечение продольного ребра назначается по требуемому моменту сопротивления:

$$W_{\text{треб}} = \frac{M_{\text{max}} \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c} \quad (6.72)$$

где R_y – расчётное сопротивление материала;

γ_c – коэффициент условий работы;

γ_n – коэффициент надёжности по назначению.

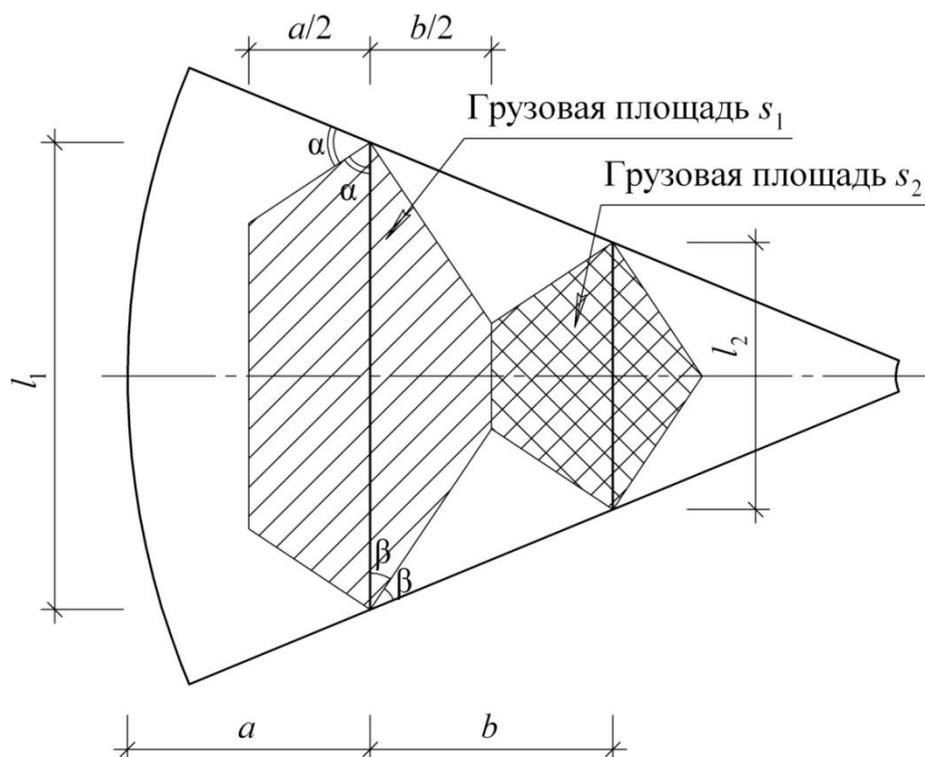


Рис.6.7 – Определение грузовых площадей для поперечных рёбер

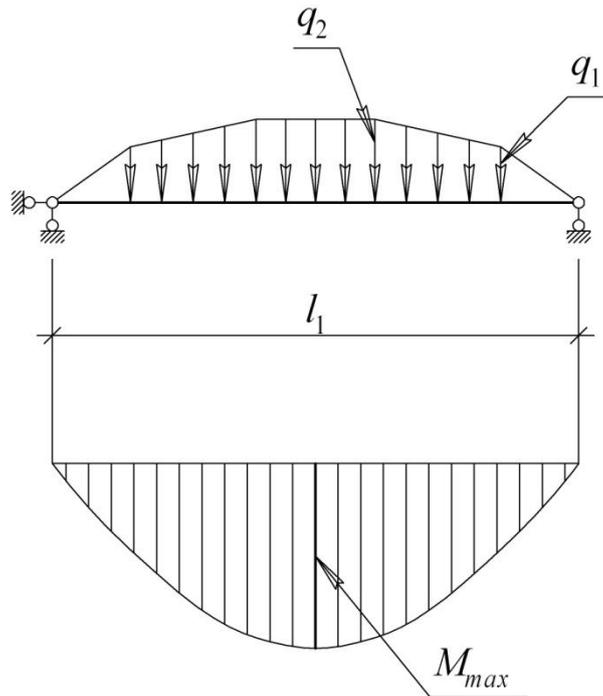


Рис.6.8 – Расчётная схема поперечных рёбер

Поперечное ребро проверяется на прочность по формуле (28) [2]:

$$\frac{M}{W} = \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}. \quad (6.73)$$

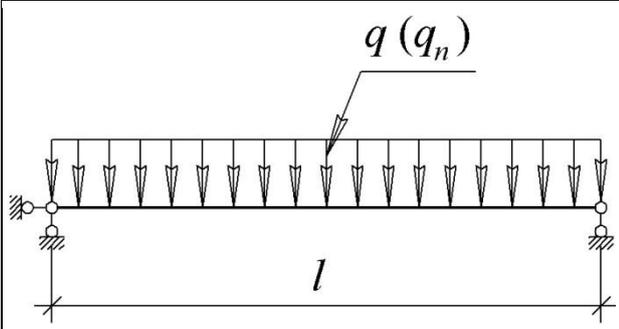
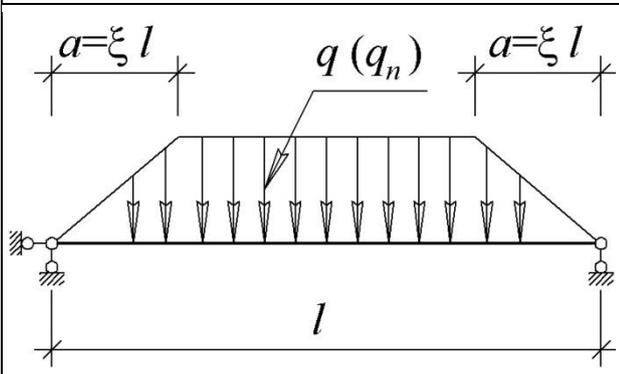
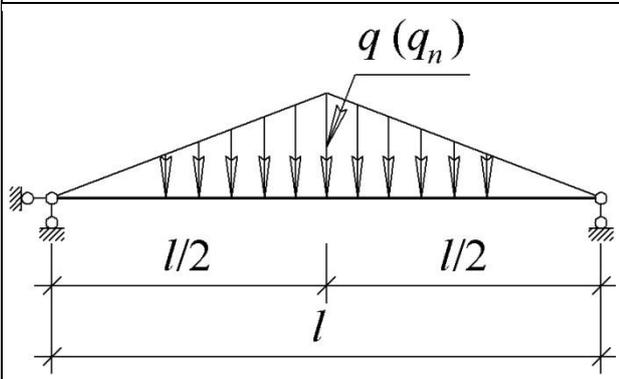
Принятое сечение ребра необходимо проверить по предельному прогибу:

$$f_{max} \leq [f], \quad (6.74)$$

где $[f]$ – предельный прогиб по [5].

Усилия и прогибы могут быть получены как численными, так и аналитическими методами (табл. 6.7).

Таблица 6.7 – Максимальные изгибающие моменты и максимальные прогибы в простых балках

Схема нагрузки	Максимальный изгибающий момент	Максимальный прогиб
	$M_{max} = \frac{q \cdot l^2}{8}$	$f_{max} = \frac{5}{384} \frac{q_n \cdot l^4}{E \cdot I_x}$
	$M_{max} = \frac{q \cdot l^2}{8} - \frac{q \cdot a^2}{6}$	$f_{max} = \frac{5}{384} \frac{q_n \cdot l^4}{E \cdot I_x} \times \left(1 - \frac{8}{5} \xi^2 + \frac{16}{25} \xi^4 \right)$
	$M_{max} = \frac{q \cdot l^2}{12}$	$f_{max} = \frac{q_n \cdot l^4}{120 \cdot E \cdot I_x}$

6.2.4 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»).

6.2.4.1 Расчёт радиальных рёбер резервуара с центральной стойкой

Расчёт 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).

Расчётная схема радиальных рёбер резервуара с центральной стойкой показана на рис. 6.10.

Максимальный изгибающий момент в шарнирно опертой балке, нагруженной сплошной нагрузкой треугольного вида:

$$M_{max} = \frac{p \cdot r^2}{9\sqrt{3}}, \quad (6.76)$$

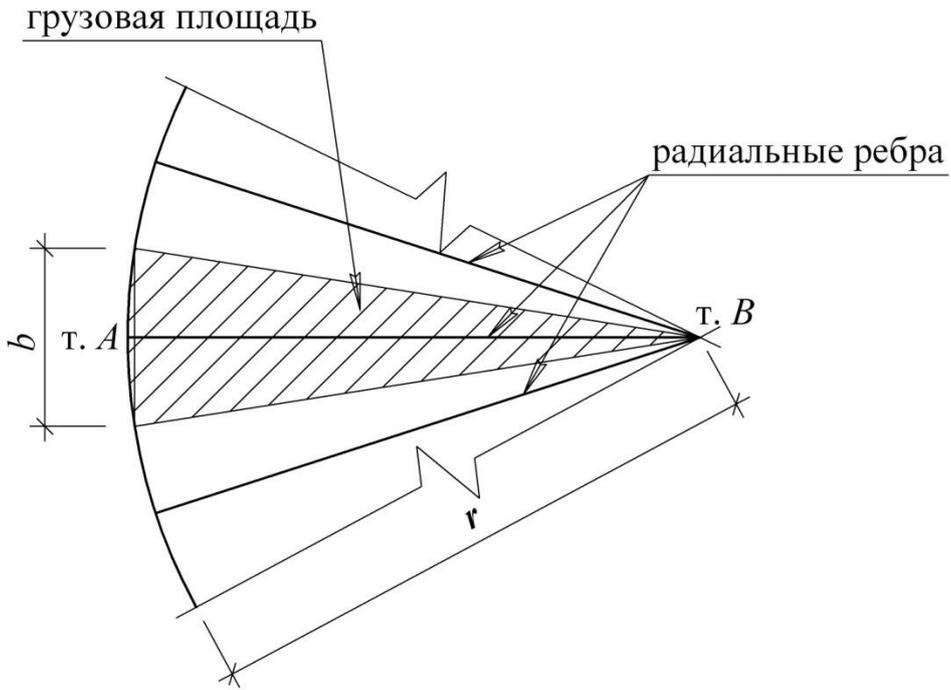


Рис.6.9 – Определение грузовых площадей для радиальных рёбер

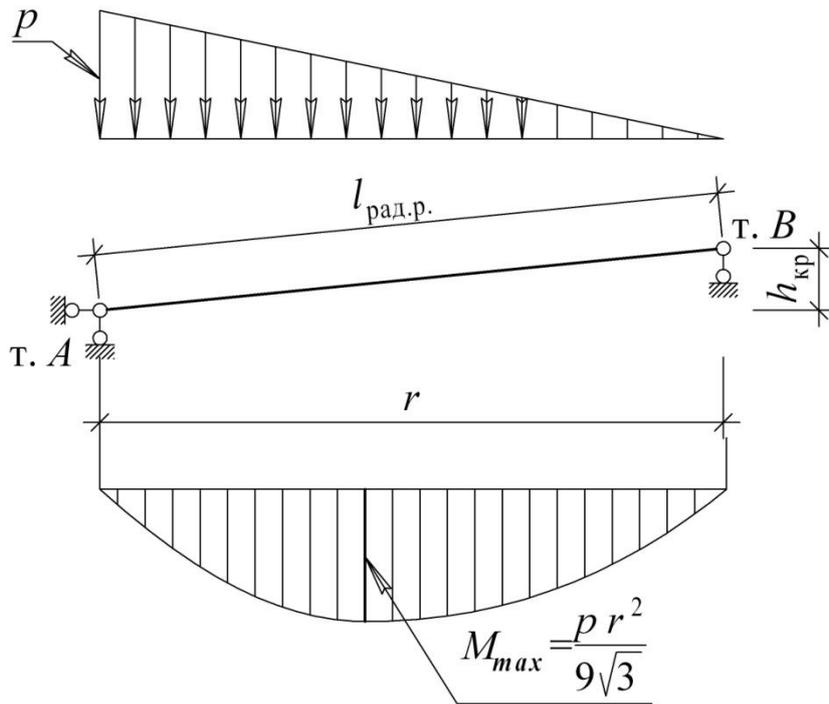


Рис.6.10 – Расчётная схема радиальных рёбер резервуара с центральной стойкой

Максимальный прогиб шарнирно опёртой 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.

Сечения радиальных рёбер принимают обычно в виде прокатных двутавров или швеллеров.

Требуемый момент сопротивления сечения из условия обеспечения прочности можно определить по формуле (6.72).

Требуемый момент инерции сечения из условия обеспечения жёсткости (при предельном прогибе $[f]$, табл. 19 [5]):

$$I_{\text{треб}} = \frac{p_n \cdot r^4}{153 \cdot E \cdot [f]}. \quad (6.79)$$

Радиальное ребро проверяется на прочность по формуле (6.73), на жёсткость по формуле (6.74).

6.2.4.2 Расчёт радиальных рёбер резервуара 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.

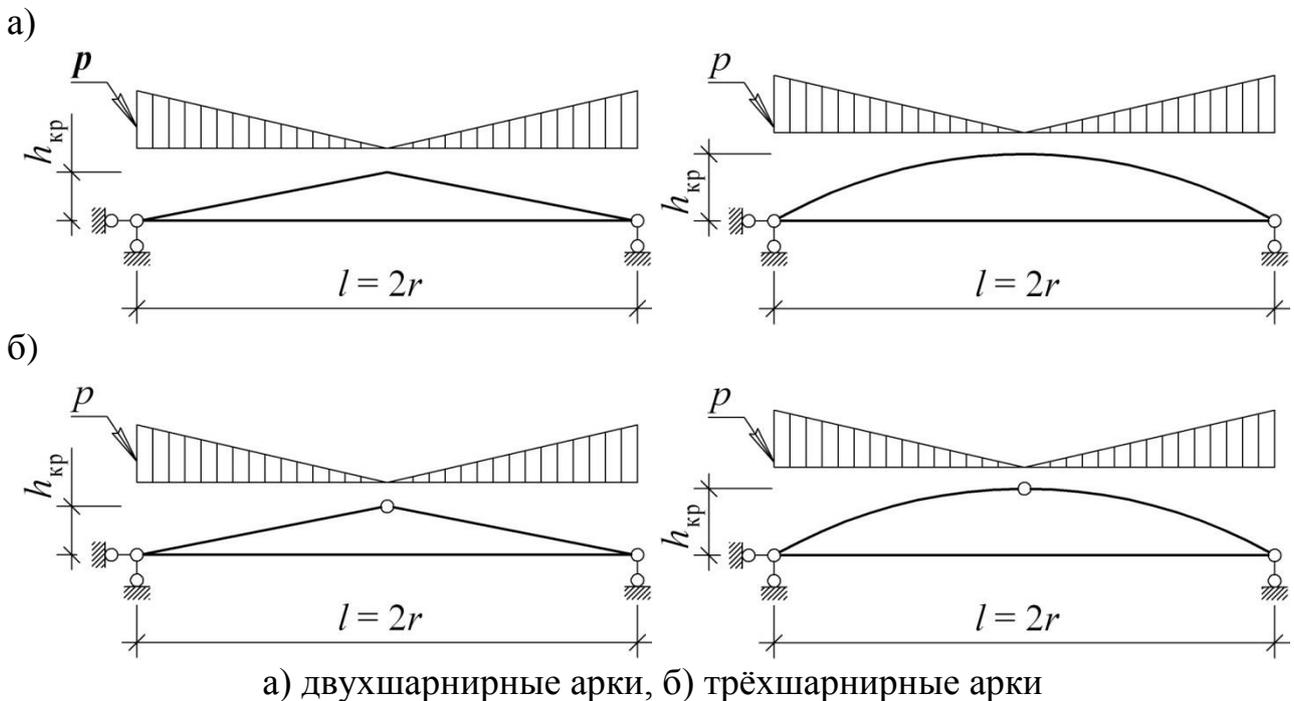


Рис.6.11 – Варианты расчётных схем радиальных балок

Статический расчёт трёхшарнирной арки криволинейного очертания

Трёхшарнирная арка является статически определимой системой. Вертикальная реакция от внешней нагрузки определяется по формуле:

$$V = \frac{p \cdot l}{4} = \frac{p \cdot r}{2}. \quad (6.80)$$

Распор арки определяется по формуле:

$$H = \frac{M_0}{h_{кр}}, \quad (6.81)$$

где M_0 – балочный момент в середине пролета арки, т.е. при $x = l/2$.

Определение M_0 может быть произведено на основе общего выражения для балочного момента $M_{\bar{6}}$, которое при принятом распределении внешней нагрузки (рис. 6.11, б) имеет следующий вид:

$$M_{\bar{6}} = V \cdot x - p_x \cdot \frac{x^2}{2} - (p - p_x) \cdot \frac{x^2}{3}, \quad (6.82)$$

где p_x – значение (ордината) суммарной внешней нагрузки, соответствующее координате x (расстояние от левой опоры до рассматриваемого сечения). Для интервала $0 \leq x \leq l/2$:

$$p_x = p \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot x}{l}\right). \quad (6.83)$$

Чтобы определить $M_{\bar{6}}$ в каком-либо сечении x нужно подставить значение x и p_x в (6.82).

Момент M_0 при $x = l/2$ равен:

$$M_0 = \frac{p \cdot l^2}{24}, \quad (6.84)$$

Тогда распор арки определится по формуле:

$$H = \frac{p \cdot l^2}{24 \cdot h_{\text{кр}}}. \quad (6.85)$$

Изгибающий момент в произвольном сечении x арки:

$$M_x = M_{\bar{0}} - H \cdot y, \quad (6.86)$$

где y – соответствующая координата арки для какой-либо произвольной координаты x по горизонтальной оси, которая может быть определена по формуле:

$$y = h_{\text{кр}} - R_{\text{пов}} + \sqrt{R_{\text{пов}}^2 - \left(\frac{l}{2} - x\right)^2}, \quad (6.87)$$

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

Значения нормальной и поперечной сил в произвольном сечении x определяются по формулам:

$$N_x = -(Q_{\bar{0}} \cdot \sin \alpha + H \cdot \cos \alpha), \quad (6.88)$$

$$Q_x = Q_{\bar{0}} \cdot \cos \alpha - H \cdot \sin \alpha, \quad (6.89)$$

где α – угол между касательной к оси арки в сечении « x » и горизонтом (рис. 6.12);

$$\sin \alpha = \left(\frac{l}{2} - x\right) \cdot \frac{1}{R_{\text{пов}}};$$

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha};$$

$Q_{\bar{0}}$ – балочная поперечная сила:

$$Q_{\bar{0}} = V - \frac{p + p_x}{2} \cdot x. \quad (6.90)$$

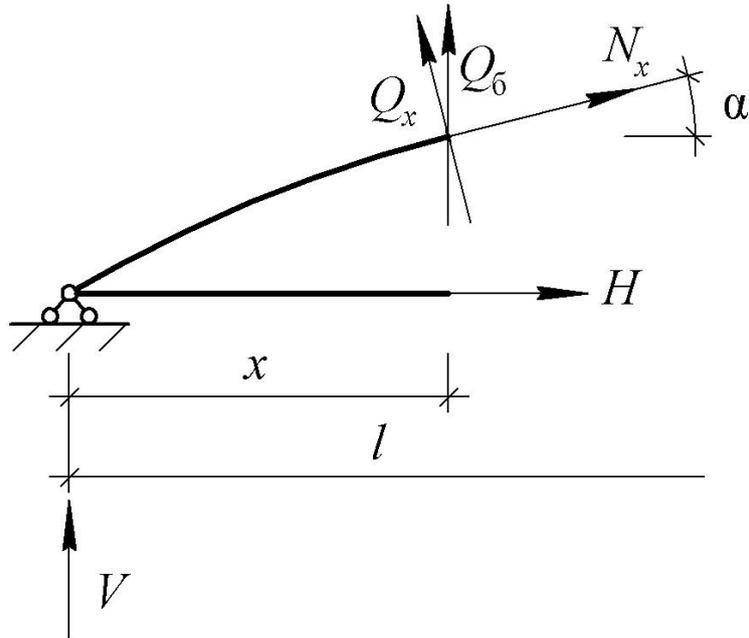


Рис.6.12 – Нормальная и поперечная силы в произвольном сечении x

По приведенным формулам необходимо найти наиболее неблагоприятные сочетания усилий M и N . Усилие Q обычно не учитывают.

Статический расчёт трёхшарнирной арки ломаного очертания

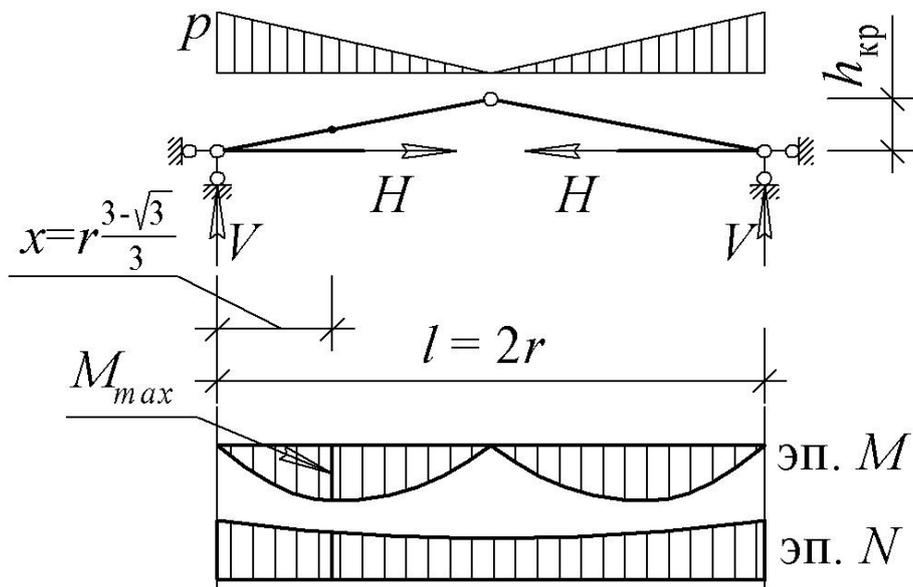


Рис.6.13 – Расчётная схема радиальных рёбер

Опорные реакции и усилия в рёбрах определяются по формулам:

– опорные реакции вертикальные:

$$V = \frac{p \cdot l}{4} = \frac{p \cdot r}{2}; \quad (6.91)$$

– опорные реакции горизонтальные:

$$H = \frac{p \cdot l^2}{24 \cdot h_{\text{кр}}} = \frac{p \cdot r^2}{6 \cdot h_{\text{кр}}}. \quad (6.92)$$

Максимальный момент на расстоянии $x = r \left(1 \pm \frac{\sqrt{3}}{3} \right)$ от опоры:

$$M_{\text{max}} = \frac{p \cdot r^2}{9\sqrt{3}}. \quad (6.93)$$

Соответствующее продольное усилие в радиальной балке щита:

$$N = \frac{H}{r} \cdot \sqrt{h_{\text{кр}}^2 + r^2}. \quad (6.94)$$

При нагрузке «сверху вниз» радиальное ребро – сжато-изгибаемое, при нагрузке «снизу вверх» – растянуто-изгибаемое.

Статический расчёт двухшарнирной арки криволинейного очертания

Двухшарнирная арка является однажды статически неопределимой системой. За неизвестное принимается обычно распор арки H .

В общем случае H определяется из канонического уравнения, которое в методе сил записывается в следующем виде:

$$X_1 \cdot \delta_{11} + \Delta_{1p} = 0, \quad (6.95)$$

где $X_1 = H$.

Используя формулу Мора, перемещения δ_{11} и Δ_{1p} можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned}\delta_{11} &= \int_0^S \frac{M_1^2}{EI} dS + \int_0^S \frac{N_1^2}{EF} dS + \int_0^S \mu \frac{Q_1^2}{GF} dS + \frac{l}{E_3 \cdot A_3}; \\ \Delta_{1p} &= \int_0^S \frac{M_1 M_p}{EI} dS + \int_0^S \frac{N_1 N_p}{EF} dS + \int_0^S \mu \frac{Q_1 Q_p}{GF} dS;\end{aligned}\quad (6.96)$$

где E_3 – модуль упругости материала затяжки;

A_3 – площадь сечения затяжки.

Учитывая формулы (6.86), (6.88), (6.89), указанные выражения можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\delta_{11} &= \int_0^S \frac{y^2}{EI} dS + \int_0^S \frac{\cos^2 \alpha}{EF} dS + \int_0^S \frac{\mu \cdot \sin^2 \alpha}{GF} dS + \int_0^L \frac{1}{E_3 \cdot A_3} dl; \\ \Delta_{1p} &= - \int_0^S \frac{y \cdot M_{\bar{6}}}{EI} dS + \int_0^S \frac{Q_{\bar{6}} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{EF} dS - \int_0^S \frac{\mu \cdot Q_{\bar{6}} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{GF} dS.\end{aligned}\quad (6.97)$$

Точное интегрирование можно заменить приближенным численным. Ось арки делится на участки одинаковой длины ΔS и для каждого отдельного участка в среднем его сечении определяют величины y , I , $\sin \alpha$, $\cos \alpha$. Вычисления записывают в виде таблицы (пример табл. 6.8). Определив $\sum 1$, $\sum 2$, $\sum 3$, перемещение δ_{11} можно вычислить по формуле:

$$\delta_{11} = \sum 1 + \sum 2 + \sum 3 + \frac{l}{E_3 \cdot A_3}.\quad (6.98)$$

Аналогично вычисляется перемещение Δ_{1p} .

Таблица 6.8 – Вычисление δ_{11} приближенным численным способом

№ элемента	y	F	I	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	ΔS	$y^2 \cdot \Delta S$	$\frac{\cos^2 \alpha}{EF} \Delta S$	$\frac{\mu \cdot \sin^2 \alpha}{GF} \Delta S$
1									
2									
...									
							$\sum 1$	$\sum 2$	$\sum 3$

При расчете двухшарнирной арки следует на начальном этапе задаться геометрическими характеристиками или сечениями арки и наружного опорного кольца. Площадь сечения опорного кольца A_k в первом приближении может быть принята равной 100 см². В реальных резервуарах A_k колеблется в пределах от 90 до 120 см². Площадь сечения затяжки A_3 можно определить по формуле:

$$A_3 = A_k \cdot \frac{b}{l/2}. \quad (6.99)$$

При известных δ_{11} и Δ_{1p} определяется $X_1 = H$ и усилия в арке M_x, Q_x, N_x (формулы (6.86), (6.88), (6.89)).

В частном случае, когда поперечное сечение двухшарнирной арки ребристого купола с одной нижней затяжкой принимается постоянным по всей длине арки, распор H может быть определен по формуле [18]:

$$H = \frac{p \cdot l^2}{24 \cdot h_{кр}} \cdot k, \quad (6.100)$$

$$\text{где } k = \frac{1}{1+v}, \quad v = \frac{15}{8} \cdot \frac{I}{h_{кр}^2} \cdot \left(\frac{E}{E_3 \cdot A_3} + \frac{n}{A} \right);$$

I, A – момент инерции и площадь сечения радиального ребра;

n – коэффициент, зависящий от отношения $h_{кр}/l$ (табл. 6.9).

Таблица 6.9 – Значения коэффициента n

$h_{кр}/l$	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	1/10	1/15	1/20
n	0,6960	0,7852	0,8434	0,8812	0,9110	0,9306	0,9424	0,9521	0,9706	0,9888

Статический расчёт двухшарнирной арки ломаного очертания

Опорные реакции и усилия в рёбрах определяются по формулам:

– опорные реакции вертикальные:

$$V = \frac{p \cdot l}{4} = \frac{p \cdot r}{2}; \quad (6.101)$$

– опорные реакции горизонтальные:

$$H = \frac{9 \cdot p \cdot l^2}{160 \cdot h_{кр}} = \frac{9 \cdot p \cdot r^2}{40 \cdot h_{кр}}. \quad (6.102)$$

Максимальный момент на расстоянии $x = r$:

$$M_{max} = \frac{7}{120} p \cdot r^2. \quad (6.103)$$

Соответствующее продольное усилие в радиальной балке щита:

$$N = \frac{H \cdot r}{\sqrt{h_{кр}^2 + r^2}}. \quad (6.104)$$

Максимальный положительный момент на расстоянии $x = r \left(1 \pm \frac{3}{2\sqrt{5}} \right)$:

$$M_{max}^+ = \frac{27\sqrt{5} - 35}{600} p \cdot r^2 = 0,04229 \cdot p \cdot r^2. \quad (6.105)$$

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, $\beta = \arctg \frac{r}{R_{\text{пов}} - h_{\text{кр}}}$;

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].

6.2.5 Расчёт 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].

Расчётная схема опорного кольца на действие распоров – бесконечная балка, нагруженная сосредоточенными силами. При комбинации загрузений «сверху-вниз» опорное кольцо растянуто-изгибаемое (рис. рис. 6.14, а), при комбинации «снизу-вверх» – сжато-изгибаемое (рис. 6.14, б). Величина распора N определяется по формулам (6.85), (6.92), (6.100) подраздела 6.2.4.2 в зависимости от того, по какой расчётной схеме рассчитывается купол.

Значения продольной силы и изгибающего момента определяются по формулам [20]:

$$N_{\kappa} = \frac{H}{2 \sin \frac{\pi}{n}} \cos \left(\frac{\pi}{n} - \varphi \right); \quad (6.109)$$

$$M_{\kappa} = -\frac{H \cdot r}{2} \left[\frac{n}{\pi} - \frac{\cos \left(\frac{\pi}{n} - \varphi \right)}{\sin \frac{\pi}{n}} \right]; \quad (6.110)$$

где n – количество радиальных ребер;

φ – угол в пределах от 0 до α ;

α – угол между радиальными ребрами, $\alpha = 2\pi/n$.

При $\varphi = 0$ или $\varphi = \alpha$ – место опирания ребра (момент на опоре), при $\varphi = \alpha/2$ – середина между соседними ребрами (момент в пролёте).

Максимальный изгибающий момент и продольная сила в кольце могут быть определены упрощенно, как для многопролётной неразрезной балки, нагруженной силами H с шагом a , которые уравновешены равномерно распределённой погонной нагрузкой $q_{\text{экв}}$:

$$N_{\kappa} = \frac{H \cdot r}{a}; \quad (6.111)$$

$$M_{\kappa}^{\text{оп}} = \frac{H \cdot a}{12}; \quad (6.112)$$

$$M_{\kappa}^{\text{пр}} = \frac{H \cdot a}{24}; \quad (6.113)$$

где a – шаг ребер (рис. 6.14); $a = \frac{2\pi \cdot r}{n}$.

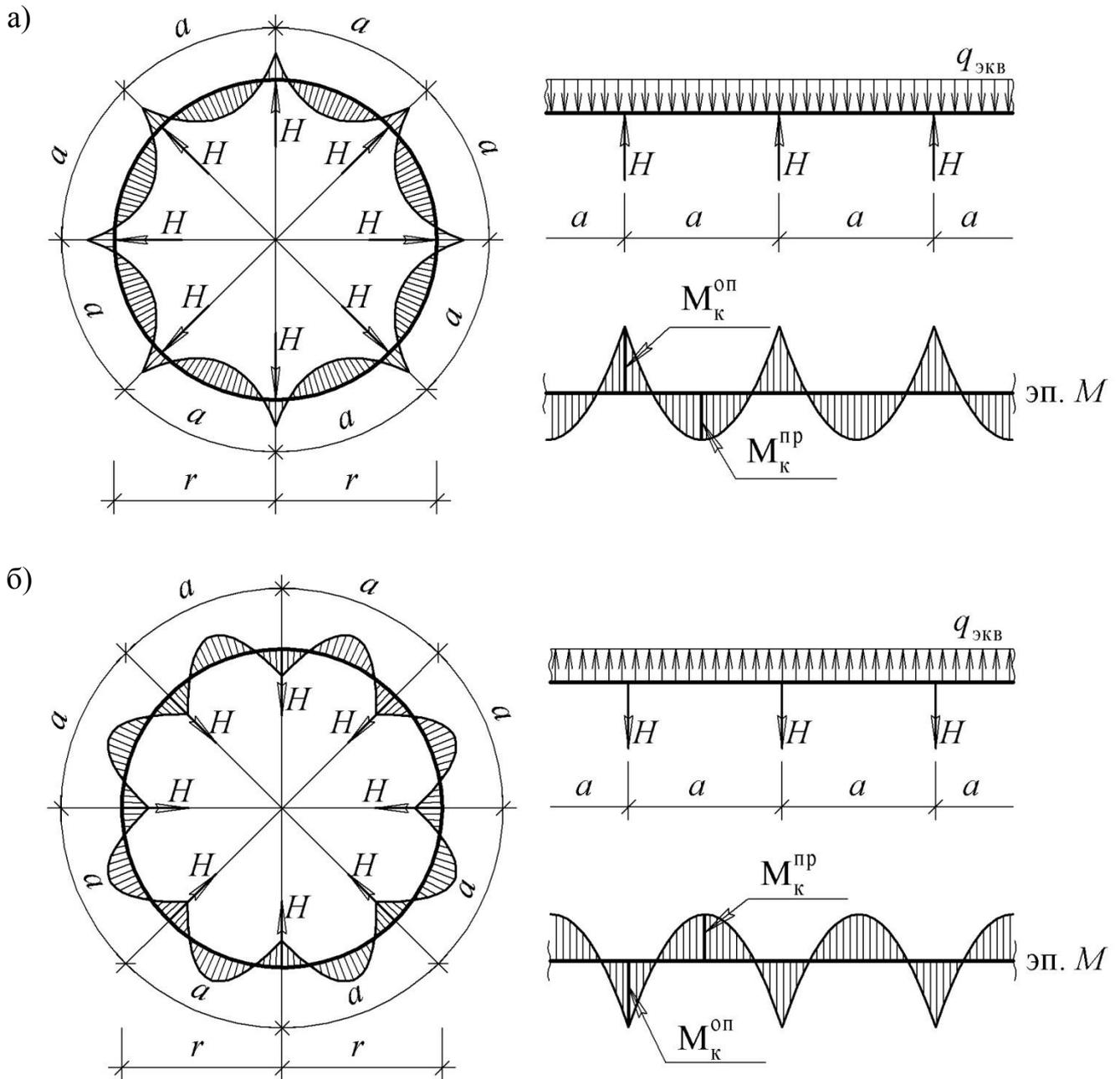


Рис. 6.14 – Расчётные схемы опорного кольца на действие распоров

Вакуум вызывает дополнительные сжимающие усилия в опорном кольце [19]:

$$N_{к, \text{вак}}^- = -0,4 \cdot H_{\text{ст}} \cdot \gamma_{f \text{вак}} \cdot P_{\text{вак} n} \cdot r. \quad (6.114)$$

Избыточное давление вызывает дополнительные растягивающие усилия:

$$N_{к,и}^+ = 0,4 \cdot H_{ст} \cdot \gamma_{f и} \cdot P_{ин} \cdot r. \quad (6.115)$$

Наибольшее сжимающее усилие и соответствующий изгибающий момент от ветровой нагрузки на верхней части стенки высотой $0,4H_{ст}$ в точке Б (рис. 6.15) определяются по формулам [19]:

$$\begin{aligned} N_{к,вет}^- &= -0,4 \cdot H_{ст} \cdot \gamma_{f вет} \cdot w_0 \cdot k \cdot c_{e1} \cdot r \cdot \sin 36^\circ; \\ M_{к,вет}^- &= -0,14 \cdot H_{ст} \cdot \gamma_{f вет} \cdot w_0 \cdot k \cdot r^2; \end{aligned} \quad (6.116)$$

где c_{e1} – аэродинамический коэффициент по [5], $c_{e1} \approx 0,6$;

k – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте, определяется для середины участка стенки высотой $0,4H_{ст}$, т.е. на высоте $z = 0,8H_{ст}$.

Наибольшее растягивающее усилие и соответствующий изгибающий момент в точке А (рис. 6.15):

$$\begin{aligned} N_{к,вет}^+ &= 0,4 \cdot H_{ст} \cdot \gamma_{f вет} \cdot w_0 \cdot k \cdot c'_{e1} \cdot r \cdot \sin 45^\circ; \\ M_{к,вет}^+ &= -0,14 \cdot H_{ст} \cdot \gamma_{f вет} \cdot w_0 \cdot k \cdot r^2; \end{aligned} \quad (6.117)$$

где c'_{e1} – аэродинамический коэффициент, $c'_{e1} \approx 1,0$.

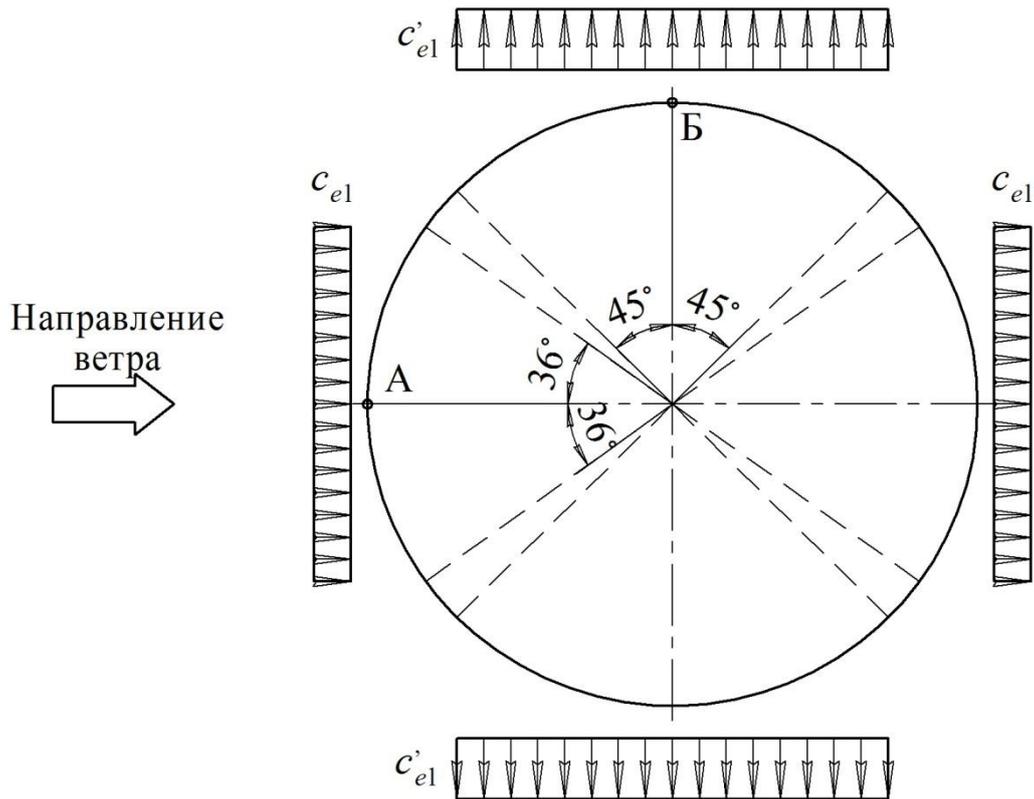


Рис. 6.15 – Упрощенная эпюра аэродинамического коэффициента для стенки резервуара

Возможными расчётными сочетаниями усилий для опорного кольца будут:

- нагрузки «сверху-вниз» на покрытие (без учёта ветровой нагрузки) и вакуум на стенку;
- нагрузки «сверху-вниз» на покрытие (с учётом ветрового отсоса на покрытие), вакуум на стенку и ветровое давление на стенку;
- нагрузки «снизу-вверх» на покрытие (с учётом ветрового отсоса на покрытие), избыточное давление на стенку, ветровая нагрузка на стенку.

При схеме «щитовое покрытие с центральной стойкой» опорное кольцо не воспринимает распор от покрытия, и в расчёте учитываются только нагрузки на стенку. Минимальное сечение кольца – равнополочный уголок 63×5.

Опорное кольцо рассчитывается на прочность и устойчивость при совместном действии момента и продольной силы на самое неблагоприятное сочетание усилий.

Предварительно компоуется сечение опорного кольца (с учётом (6.99) при двухшарнирной арке) и вычисляются основные геометрические характеристики. В сечение опорного кольца следует включать участок стенки резервуара шириной $0,65t\sqrt{E/R_y}$.

Проверка прочности выполняется по формуле:

$$\frac{N_k}{A_k} + \frac{M_k}{W_{y, \min, k}} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}, \quad (6.118)$$

где N_k – продольное усилие (положительное при растяжении и отрицательное при сжатии);

M_k – максимальный момент в кольце;

$W_{y, \min, k}$ – момент сопротивления кольца относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести сечения, определяемый по отношению к наиболее растянутой наружной грани кольца, если N_k является усилием растяжения, и по отношению к наиболее сжатой грани, если N_k – усилие сжатия. При одностороннем ребре жёсткости геометрические характеристики сечения следует вычислять относительно оси, совпадающей с ближайшей поверхностью оболочки (п. 8.8* [2]);

γ_c – коэффициент условий работы, равный 1.

По второму сочетанию нагрузок «снизу-вверх» выполняется проверка устойчивости кольца в радиальном направлении:

$$\frac{N_k}{\varphi_e \cdot A_k} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}, \quad (6.119)$$

где φ_e – коэффициент устойчивости при внецентренном сжатии, определяемый в зависимости от условной приведённой гибкости $\bar{\lambda}$ и приведенного относительного эксцентриситета m_{ef} (табл. 74 [2]);

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad (6.120)$$

$E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа = 20600 кН/см² – модуль упругости прокатной стали и стальных отливок (по табл. 63 [2]);

λ – гибкость,

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i_k}, \quad (6.121)$$

i_k – радиус инерции сечения,

l_{ef} – расчётная длина кольца, расстояние между радиальными ребрами a ;

$$m_{ef} = \eta \cdot m, \quad (6.122)$$

m – относительный эксцентриситет, определяемый по формуле:

$$m = \frac{M_k}{N_k} \cdot \frac{A_k}{W_c}, \quad (6.123)$$

W_c – момент сопротивления сечения наиболее сжатого волокна,

η – коэффициент влияния формы сечения, определяемый по табл. 73 [2].

Условная гибкость $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ не должна превышать 6,5.

Верхнее опорное кольцо рассчитывается аналогично. Центральное кольцо имеет расчётное сечение в виде сварного двутавра.

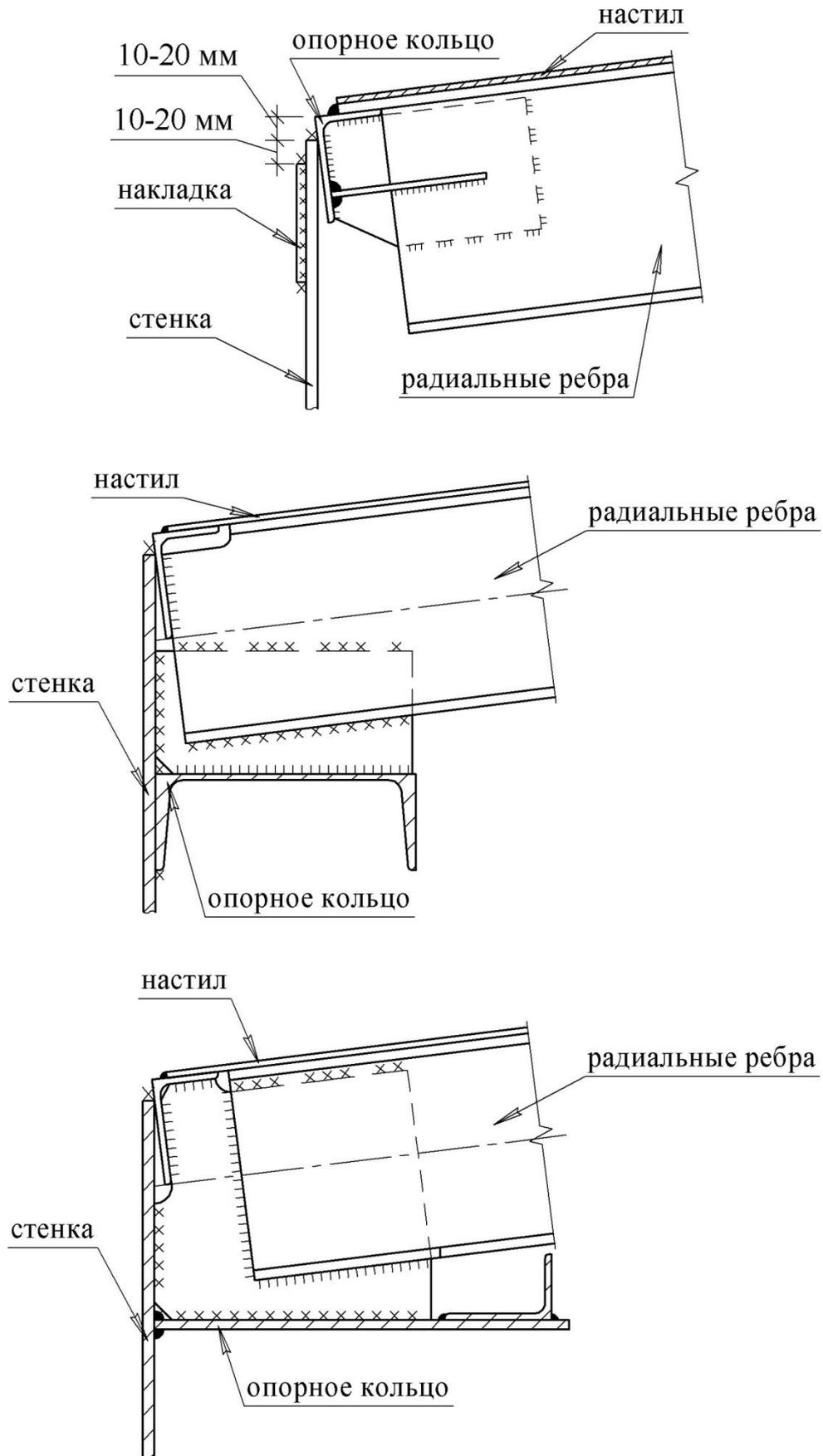


Рис. 6.16 – Примеры узла сопряжения крыши со стенкой

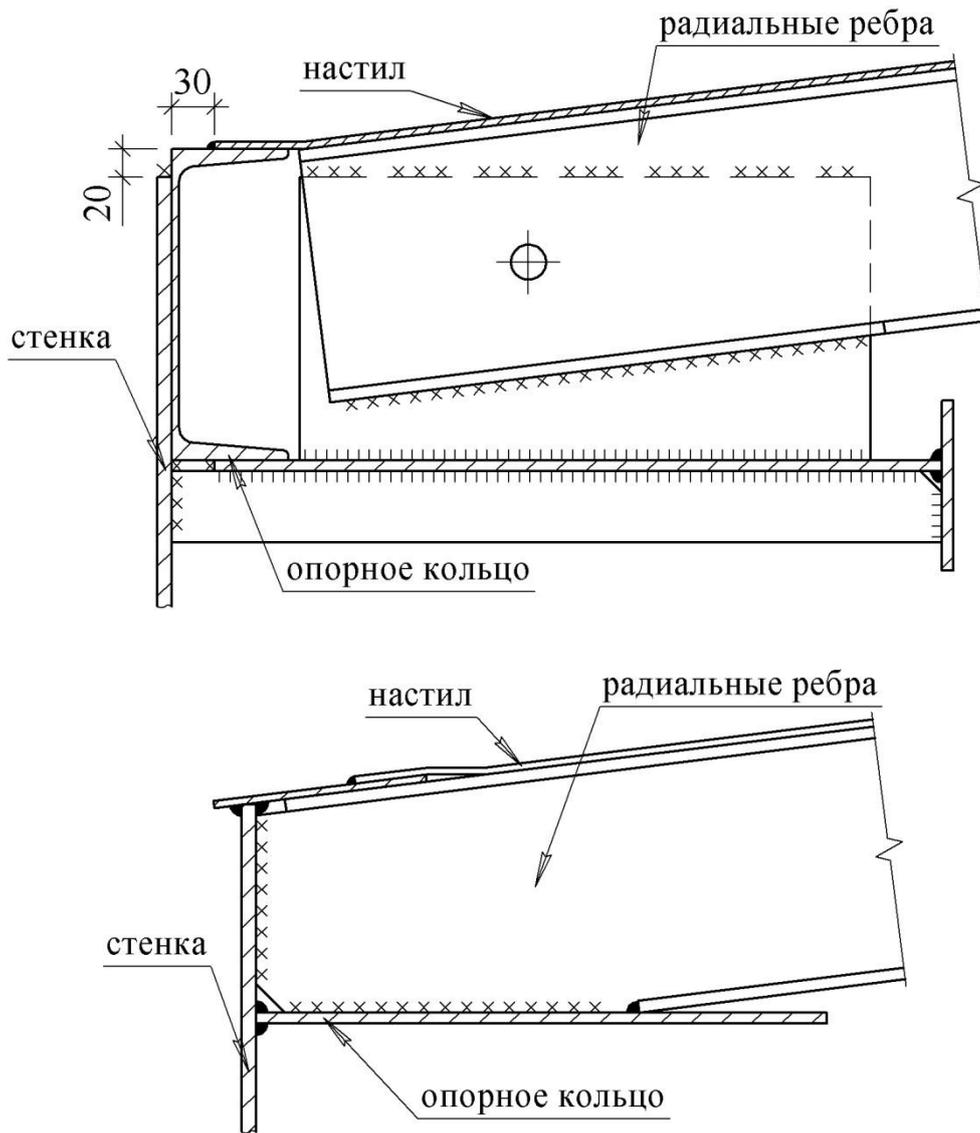


Рис. 6.17 – Примеры узла сопряжения крыши со стенкой

6.3 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. Чаще всего купола собирают на строительной площадке из трапециевидных щитов заводского изготовления. В зависимости от диаметра применяют два и более типов (ярусов) щитов. Жесткость купола на кручение обеспечивается стальным настилом и системой связей.

Приближенно 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 (подраздел 6.2.5).

При монтаже купола из укрупненных щитов устанавливают временную центральную монтажную стойку, на которой монтируют центральное кольцо. Под промежуточными кольцами также устанавливают временные опоры. Щиты укладывают на кольца ярусами, начиная с нижнего яруса. До удаления временных опор радиальные ребра щитов будут работать по балочной (безраспорной) схеме от собственного веса. После удаления временных опор радиальные ребра щитов совместно с кольцами образуют уже купольную (пространственную) систему.

6.4 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. Под избыточным давлением 2 кПа при толщине слоя жидкости 300 мм края незакрепленного днища поднимаются: в резервуаре ёмкостью 5000 м³ – на 50 мм, а в резервуаре ёмкостью 10000 м³ – на 80 мм [12].

Анкерные крепления располагают по периметру стенки резервуара на равных расстояниях не более 3 м друг от друга. Месторасположение анкерных болтов должно быть удалено от монтажного шва не менее чем на 0,75 м.

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.

6.5 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.

Расчет центральной стойки производится на центрально приложенную осевую силу:

$$N_c = R \cdot n, \quad (6.124)$$

R – реакция шарнирно опертой радиальной балки в т. B (рис. 6.10):

$$R = \frac{p \cdot r}{6}; \quad (6.125)$$

n – количество щитов.

Используются трубчатые или решётчатые стойки.

Расчёт стойки на устойчивость, как для центрально сжатого элемента, выполняется по формуле (7) [2]:

$$\frac{N_c}{\varphi \cdot A_c} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}. \quad (6.126)$$

Сжатая стойка проверяется по гибкости (п. 6.15* [2]):

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i_c} \leq \lambda_u = 180 - 60\alpha. \quad (6.127)$$

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 (рис. 3.7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1) **ПБ 03-605-03.** Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс] : утв. Госгортехнадзором России 09.06.03 : взамен ПБ 03-381-00. – Режим доступа : Стройконсультант.
- 2) **СНиП II-23-81*.** Стальные конструкции : строит. нормы и правила [Текст] : утв. Госстроем СССР 14.08.81 : взамен СНиП II-В.3-72; СНиП II-И.9-62; СН 376-67 : дата введ. 01.01.82. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
- 3) **Пособие по проектированию стальных конструкций** (к СНиП II-23-81* «Стальные конструкции») [Текст] : утв. ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР 15.08.85. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.
- 4) **СП 53-102-2004.** Общие правила проектирования стальных конструкций [Текст] : свод правил по проектированию и строительству : утв. и введен ЦНИИСК им. Кучеренко 01.01.05 : введен впервые. – М. : ФГУП ЦПП, 2005. – 188 с.
- 5) **СНиП 2.01.07-85*.** Нагрузки и воздействия [Текст] : строит. нормы и правила : утв. Госстроем СССР 29.07.85 : взамен главы СНиП II-6-74 : дата введ. 01.01.87. – М. : ФГУП ЦПП, 2005. – 44 с.
- 6) **Металлические конструкции** [Текст] : справочник проектировщика : в 3 т. / под общ. ред. В. В. Кузнецова. – М. : АСВ, 1998. – Т. 1-3.
- 7) **ГОСТ 31385-2008.** Резервуары вертикальные цилиндрические для нефти и нефтепродуктов [Текст] : межгосударственный стандарт : введ. 01.07.2010. – М. : Стандартинформ, 2010. – 56 с.
- 8) **Металлические конструкции. Справочник проектировщика** [Текст] / под ред. Н. П. Мельникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1980. – 776 с.

- 9) **Металлические конструкции. Общий курс** [Текст] : учеб. для вузов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Ведеников [и др.]. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1986. – 560 с.
- 10) **Вертикальный цилиндрический резервуар** [Текст] : метод. указания к выполнению курсового проекта «Листовая конструкция» / сост. И. В. Молев, В. С. Ширманов. – Горький : ГИСИ им. В. П. Чкалова, 1987. – 83 с.
- 11) **Металлические конструкции** [Текст] : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Ю. И. Кудишин, Е. И. Беленя, В. С. Игнатьева [и др.] / под ред. Ю. И. Кудишина. – 9-е изд., стер. – М. : Академия, 2007. – 688 с.
- 12) **Лессиг, Е. Н.** Листовые металлические конструкции [Текст] / Е. Н. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М. : Стройиздат, 1970. – 488 с.
- 13) **Мандриков, А. П.** Примеры расчёта металлических конструкций [Текст] : учеб. пособие для техникумов / А. П. Мандриков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1991.-431 с.
- 14) **СНиП 2.09.03-85.** Сооружения промышленных предприятий [Электронный ресурс] : строит. нормы и правила : утв. Госстроем России : взамен СНиП II-91-77, СН 302-65, СН 471-75 : дата введ. 01.01.87. – Режим доступа : Стройконсультант.
- 15) **ГОСТ 27751-88.** Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчёту [Электронный ресурс] : гос. стандарт СССР : дата введ. 01.07.88. – Режим доступа : Стройконсультант.
- 16) **Сафарян, М. К.** Проектирование и сооружение стальных резервуаров для нефтепродуктов [Текст] / М. К. Сафарян, О. М. Иванцов. – М. : Гостоптехиздат, 1961. – 328 с.

- 17) **Металлические конструкции** [Текст] : учебник для строит. вузов : в 3 т. / В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов [и др.] / под ред. В. В. Горева. – 3-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2004. – Т. 1-3.
- 18) **Справочник проектировщика** промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчётно-теоретический [Текст] : в 2 кн. / под ред. А. А. Уманского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1972. – Кн. 1-2.
- 19) **Нехаев, Г. А.** Проектирование и расчет стальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров низкого давления [Текст] : учеб. пособие для студентов по направлению 653500 «Стр-во» / Г. А. Нехаев. – М. : АСВ, 2005. – 216 с.
- 20) **Прочность. Устойчивость. Колебания** [Текст] : справочник : в 3 т. / под общ. ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. – М. : Машиностроение, 1968. – Т. 1-3.

Лапшин Андрей Александрович

Колесов Александр Иванович

Агеева Мария Александровна

Конструирование и расчёт
вертикальных цилиндрических резервуаров
низкого давления

Учебное пособие

Редактор Фетюкова Д. М.

Подписано в печать ____ Формат 60x90 1/16 Бумага газетная. Печать трафаретная.

Уч. изд. л. 1,7 Усл. печ. л 2,1 Тираж 500 экз. Заказ № ____

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

603950, Н.Новгород, Ильинская, 65.

Полиграфцентр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65