

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Металлические и деревянные конструкции»

Е. Ю. Давыдов

**СТАЛЬНЫЕ НАЗЕМНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ.
ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА**

Пособие по дисциплине
«Металлические конструкции»
для студентов строительных специальностей

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области строительства и архитектуры*

Минск
БНТУ
2016

УДК 622.692.23.07(015.8)

ББК 38.728.я7

Д13

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *С. В. Босаков*;

глав. инженер ЗАО «Проектстальконструкция» *А. П. Зайцев*

Давыдов, Е.Ю.

Д13 Стальные наземные вертикальные резервуары. Основы конструирования и расчета: пособие по дисциплине «Металлические конструкции» для студентов строительных специальностей / Е. Ю. Давыдов – Минск: БНТУ, 2016. – 90 с.

ISBN 978-985-550-675-2.

В работе изложены основные принципы конструирования и расчета вертикальных цилиндрических резервуаров, предназначенных для хранения нефти, нефтепродуктов и жидких органических удобрений, обладающих сильной агрессивней в отношении стальных конструкций. Рассмотрены конструктивные требования и расчеты основных конструктивных элементов резервуаров на прочность и устойчивость. Методика расчета иллюстрируется численным примером. Пособие предназначено для студентов строительных специальностей.

УДК 622.692.23.07(015.8)

ББК 38.728.я7

ISBN 978-985-550-675-2

© Давыдов, Е. Ю., 2016

© Белорусский национальный

технический университет, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Материалы, применяемые для изготовления резервуаров	7
2. Конструктивные решения сварных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов	8
2.1. Конструктивные решения днища	8
2.2. Конструктивные решения корпуса (стенки) резервуара	12
2.3. Конструктивные решения покрытий	14
3. Расчет резервуаров	24
3.1. Нагрузки	24
3.2. Расчет стенки резервуара	29
3.3. Расчет промежуточного и опорного (верхнего) колец жесткости	34
3.4. Расчет сопряжения корпуса с днищем	38
3.5. Расчет покрытий (крыш) резервуаров	39
4. Особенность проектирования резервуаров для хранения жидких органических удобрений	49
4.1. Дополнительные материалы для изготовления Резервуаров	50
4.2. Особенность конструктивного решения днищ	51
4.3. Особенности проектирования стенки резервуаров	53
4.4. Особенность проектирования покрытий резервуаров	55
Литература	58
Приложение	59

ВВЕДЕНИЕ

Первые стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов были построены в России в 1878 г. по проекту выдающегося инженера-конструктора В.Г. Шухова. По сравнению с другими сосудами низкого давления вертикальные цилиндрические резервуары являются наиболее экономичными по расходу металла, отнесенному к одному куб. метру полезной емкости. При этом экономичность резервуаров возрастает с увеличением их объема.

Резервуары бывают: цилиндрические (вертикальные и горизонтальные), каплевидные и шаровые. В свою очередь, вертикальные цилиндрические резервуары могут быть наземные, надземные и подземные. В настоящем пособии рассматриваются только вертикальные цилиндрические наземные резервуары.

В большинстве случаев вертикальные цилиндрические резервуары используются для хранения нефти и нефтепродуктов. В последнее время за рубежом, а также в нашей стране такие резервуары стали возводить для хранения жидких органических удобрений. Отличительной особенностью указанных резервуаров является использования эмалей в качестве антикоррозионного покрытия, которое наносится в процессе изготовления конструктивных элементов резервуара. Эмаль – стекловидно-силикатный материал, обладающий высокими антикоррозионными свойствами, как в кислотных, так и в щелочных средах. Долговечность эмалевых покрытий составляет 40–50 лет. Кроме того, эмаль обладает высокой термостойкостью – до 600°. Эмаль обладает и специфическими механическими свойствами, которые должны быть учтены при проектировании резервуаров.

Важной проблемой при эксплуатации резервуаров для хранения нефтепродуктов является снижение потерь хранимых жидкостей. В настоящее время эта задача решается с помощью следующих конструктивных и технологических мероприятий:

– хранение жидкостей в герметически закрытых резервуарах под давлением (в газовом пространстве таких резервуаров (между поверхностью хранимой жидкости и покрытием резервуара) возникает избыточное давление);

– применение понтонов (плавающих крыш), предотвращающих соприкосновение хранимой жидкости с воздухом и тем самым способствующих уменьшению испарений;

– уменьшение колебаний температуры поверхности жидкости и газового пространства (теплоизоляция резервуара, орошение водой, окраска в белый цвет);

– применение газовых обвязок и газосборников.

Выбор способа по предотвращению потерь хранимой жидкости, а также связанные с ним конструктивные решения и выбор технологического оборудования в настоящем пособии не рассматриваются. В резервуарах для хранения жидких органических удобрений уменьшение потерь в виде испарений, как правило, не предусматривается.

Изготовление резервуаров производится полистовым способом (сборка и сварка конструктивных элементов производится на монтажной площадке) или рулонированием, когда на заводе свариваются из отдельных листов полотнища корпуса стенки и днища, которые затем сворачиваются в рулон и транспортируются на монтажную площадку, где производят их развертывание в проектное положение. Рулонирование существенно сокращает трудоемкость изготовления и повышает качество сварочных работ. Впервые высокоиндустриальный способ изготовления резервуаров с помощью рулонирования был применен в СССР в 1958 г.

Размеры резервуаров (высота и диаметр) определяются требованиями эксплуатации и экономическими соображениями. При назначении размеров резервуаров следует учитывать требования по изготовлению и монтажу конструктивных элементов. Например, в настоящее время заводы могут изготавливать полотнища для рулонирования шириной до 18 м (поэтому высота корпуса резервуара в этом случае не должна превышать 18 м). Кроме того, высота корпуса должна быть кратной ширине листов, изготавливаемых металлургической промышленностью.

В задании на проектирование должны быть указаны следующие исходные данные:

1. Район строительства;
2. Геометрические параметры (объем, диаметр или высота резервуара);
3. Плотность хранимого продукта;

4. Возможная наибольшая и наименьшая температура хранимого продукта;
5. Наличие или отсутствие стационарного покрытия (крыши);
6. Положительное и отрицательное давление в газовом пространстве резервуара (при наличии стационарной крыши);
7. Геометрические и физические характеристики теплоизоляции (при необходимости);
8. Значения и схемы расположения нагрузок от технологического оборудования;
9. Тип днища: бетонное или металлическое;
10. Характеристики грунтов, уровень грунтовых вод, глубина промерзания;
11. Припуск на коррозию основных конструктивных элементов резервуара;
12. Расчетный срок службы резервуара.

При проектировании резервуаров помимо требований, изложенных в настоящем Пособии, следует учитывать также требования по охране и гигиене труда, пожарной безопасности и экологические требования, изложенные в соответствующих нормативных документах.

В пособии рассматриваются резервуары, эксплуатация которых предусматривается в не сейсмических районах.

Изготовление резервуаров следует производить в соответствии ТКП 45-5.04-121 – 2009 «Стальные строительные конструкции. Правила изготовления и правила устройства вертикальных цилиндрических резервуаров».

1. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ

При выборе сталей следует учитывать степень ответственности и условия эксплуатации конструктивных элементов резервуара. Для основных конструкций, к которым относятся: стенка, окрайки (периметральные элементы днища, привариваемые к стенке), обвязочное (опорное) и центральное кольца, следует применять только спокойные стали следующих классов прочности: С255, С315, С345, С390, С440 и С590. Для конструкций менее ответственных используются стали тех же классов прочности, но при этом степень раскисления может быть понижена до полуспокойной. Для вспомогательных конструкций (ограждения на покрытии, лестницы, площадки) могут быть использованы также стали классов прочности С235 и С245, но уже без ограничения степени раскисления.

Допускается применение сталей поставляемых по международным и национальным стандартам других стран. При этом механические и физические характеристики этих сталей должны быть не ниже аналогичных характеристик сталей поставляемых по стандартам, действующим на территории Республики Беларусь.

Сварочные материалы принимаются в соответствии с принятыми классами прочности сталей и согласно нормативным документам. Углеродный коэффициент сталей, используемых для сварных резервуаров, не должен превышать 0,43. Особенности требований к материалам для резервуаров, используемых для хранения жидких органических удобрений (не сварных) (глава 4.).

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ СВАРНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Общий вид резервуара приведен на рис. 2.1.

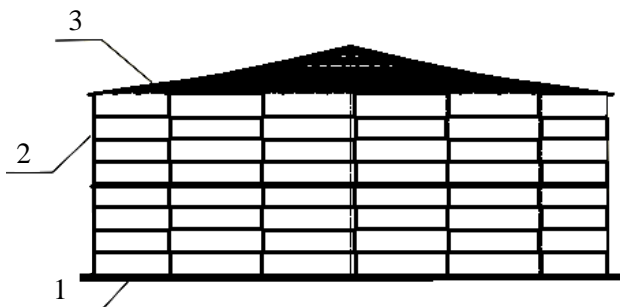


Рис. 2.1. Общий вид резервуара:
1 – днище; 2 – стенка; 3 – покрытие (крыша)

Основными конструктивными элементами резервуара являются: днище, корпус (стенка), покрытие (крыша) и в некоторых резервуарах понтон. Кроме основных конструктивных элементов резервуар включает в себя также эксплуатационное оборудование и грозовую защиту.

2.1. Конструктивные решения днища

В днище возникает незначительное напряжение (за исключением периферийной части днища), поэтому толщина днища назначается из условий сварки и коррозии, как правило, не менее 4 мм. Днище собирается из отдельных листов, поставляемых металлургической промышленностью. Сварка листов в отдельные полотнища осуществляется на заводе (при рулонировании) или на монтажной площадке (при поэлементной сборке). При сварке днища на заводе все листы соединяются встык, а затем готовое днище или его часть сворачивается в рулон для последующей транспортировки на монтажную площадку. Размер рулона и его масса определяется транспортными габаритами и мощностью транспортных средств. Как правило, диаметр рулона должен быть не более 3,25 м, а масса не более 60 т.

При сборке листов днища на монтажной площадке (при полистовой сборке) используют нахлесточные соединения с односторонними сварными швами. В особых случаях при сборке днища на специальных клетях возможно выполнение сварных швов с двух сторон.

По периметру днища располагаются специальные утолщенные стальные полосы, называемые окрайками (рис. 2.2). Окрайки являются промежуточным элементом между днищем и корпусом (стенкой). Толщина окрайков назначается равной 0,6–0,8 от толщины листов нижней части корпуса. Как правило, толщина окрайков назначается в интервале 6–14 мм при толщинах нижнего пояса резервуара в интервале 7–26 мм. При больших толщинах нижнего пояса толщина окрайков принимается равной 16 мм. Выступ окрайков за пределы корпуса резервуара принимается равным 50 мм.

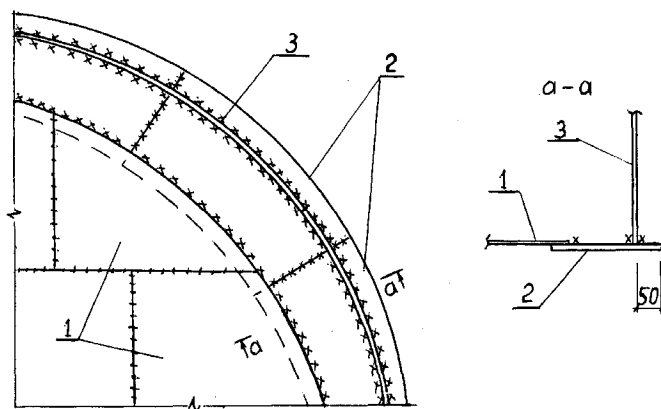


Рис. 2.2. Фрагмент днища:
1 – листы днища; 2 – окрайки; 3 – стенка

Последовательность выполнения сварных швов при изготовлении днища:

1. Соединение коротких сторон листов днища между собой;
2. То же длинных сторон;
3. Соединение отдельных частей днища между собой (при рулонировании);
4. Соединение окрайков между собой;
5. Соединение корпуса резервуара с окрайками;
6. Соединение окрайков с днищем.

При рулонировании операции № 1 и 2 выполняются на заводе. Приведенная последовательность выполнения сварных швов обеспечивает наиболее благоприятное распределение сварочных напряжений.

Соединение отдельных частей днища, поставляемых на монтажную площадку в виде рулонов, производится внахлест, при этом сварной шов выполняется только с одной верхней стороны. Величина нахлестки должна быть не менее пяти толщин соединяемых элементов и не менее 30 мм. Соединение крайков между собой выполняется с помощью стыковых односторонних швов с применением остающихся подкладок. Приварка корпуса резервуара к крайкам выполняется в тавр двухсторонними угловыми швами. При этом катет сварного шва должен быть не меньше толщины крайков. Соединение крайков с днищем осуществляется внахлестку односторонним угловым швом. Для обеспечения плотного соединения днища с крайками в местах устройства замыкающих стыков требуется нахлесточные соединения переводить в стыковые. Это делается с помощью фигурной резки (рис. 2.3). При размещении составных элементов днища предусматривается расстояние не менее 200 мм между стыками крайков и вертикальными стыками листов первого пояса корпуса резервуара.

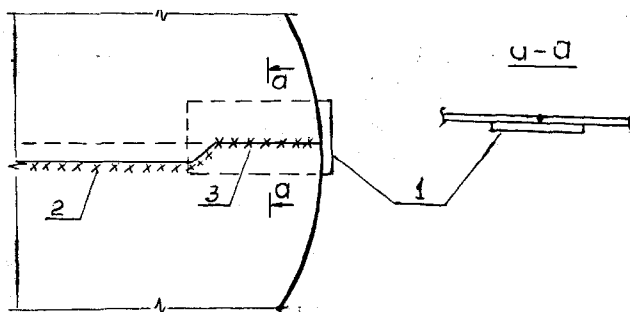


Рис. 2.3. Перевод нахлесточного соединения в стыковое:
1 – временная подкладка; 2 – угловой шов; 3 – стыковой шов

Днище резервуара располагается на специальном основании, состоящем из супесчаной подушки и изоляционного слоя (рис. 2.4). Изоляционный слой приготавливают из супесчаного грунта, смешанного с вяжущим веществом (нефтью, битумом) в соотношении 1:10. Толщина изоляционного слоя составляет 80–100 мм, диа-

метр круга изоляционного слоя должен превышать диаметр резервуара на 1–1,5 м.

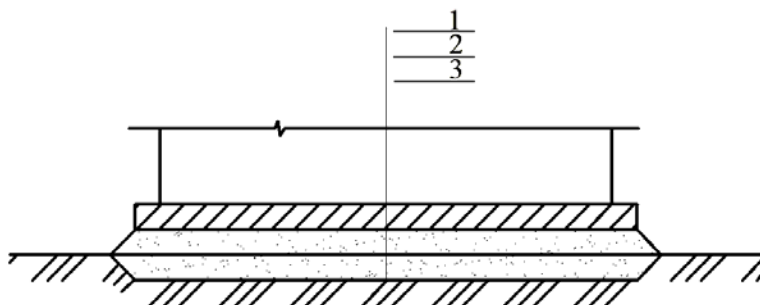


Рис. 2.4. Основание резервуара:
1 – гидроизоляционный слой; 2 – супесчаная подушка;
3 – насыпной грунт

Уплотнение изоляционного слоя производится катком или трамбовкой. Основание должно иметь уклон от центра к краям, равный 0,01–0,02. При большом внутреннем давлении (более 2 кН/м²) днище необходимо заанкерить, как это показано на рис. 2.5.

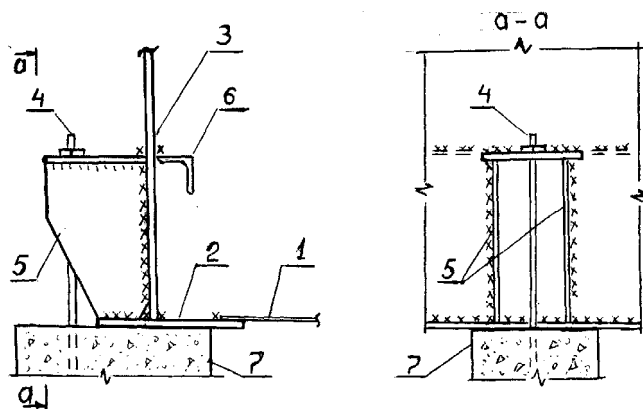


Рис. 2.5. Анкеровка днища:
1 – листы днища; 2 – окраек; 3 – стенка; 4 – анкерный стержень;
5 – опорная консоль; 6 – кольцо жесткости; 7 – бетонный фундамент

В местах, где стенка резервуара опирается на днище, основание испытывает значительно большее давление, чем в средней части, поэтому при объеме резервуара более 10 000 м³ под стенкой резервуара устраивается железобетонный фундамент в виде кольца (рис 2.6). Вокруг резервуара должна быть устроена отмостка шириной не менее 700 мм с уклоном 1:10.

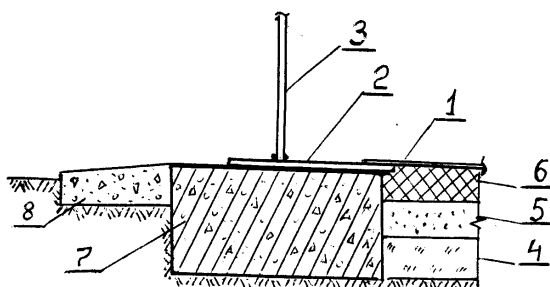


Рис. 2.6. Фрагмент основания, усиленного железобетонным кольцом:

- 1 – днище; 2 – окраек; 3 – стенка; 4 – насыпной грунт;
- 5 – супесчаная подушка; 6 – гидроизоляционный слой;
- 7 – железобетонный кольцевой фундамент; 8 – отмостка

2.2. Конструктивные решения корпуса (стенки) резервуара

Стенка резервуара состоит из отдельных поясов (горизонтальных колец), образуемых стальными листами. Ширина каждого пояса определяется шириной листов, как правило, это (1,5–2,2) м с градацией 100 мм.

Корпус, как и днище, может быть собран из отдельных листов на монтажной площадке с помощью полистовой сборки или изготовлен на заводе с последующей поставкой на монтажную площадку в виде рулона. Второй способ является более индустриальным, однако его применение ограничивается толщиной листов корпуса: при толщине более 18 мм рулонирование становится затруднительным.

При использовании рулонирования все соединения листов выполняются сварными стыковыми швами, двухсторонними или односторонними с подваркой корня. Такие соединения, в отличие от нахлесточных, не увеличивают расход металла и изгибающую жест-

кость, что является существенным фактором при рулонировании. Для обеспечения требуемого зазора в стыках перед началом сварки все кромки листов строгаются. Монтажный (замыкающий) вертикальный стык полотнища стенки резервуара выполняется как встык, так и внахлестку. Величина нахлеста при этом составляет 70–80 мм.

При полистовой сборке вертикальные соединения листов между собой в пределах каждого пояса выполняются встык, а горизонтальные (соединения поясов между собой) – внахлестку. При этом наружный сварной шов всегда делается сплошным, а внутренний может быть прерывистым, если среда эксплуатации не является сильно агрессивной. В противном случае оба шва делают сплошными. Сплошные швы должны обеспечивать не только прочность, но и газонепроницаемость.

Толщина листов корпуса определяется расчетом на прочность и устойчивость (п. 3.2.1 и 3.2.2) и может быть для всех поясов одинаковой или разной. Наименьшая толщина листов корпуса из условия сварки и коррозии не должна быть меньше 4 мм, плюс минусовые допуски на прокат и припуск на коррозию, а наибольшая толщина, как было отмечено выше, ограничивается условиями рулонирования. Для уменьшения толщины стенки корпуса возможно использование сталей различной прочности: для верхней части корпуса используется малоуглеродистая сталь, а для нижней части, наиболее напряженной, используется легированная сталь. Также, для уменьшения толщины листов нижней части резервуара, используется преднапряжение – обмотка нижних поясов высокопрочной проволокой. При этом степень обжатия поясов определяется их устойчивостью. С этой же целью возможно применение для нижней части резервуара двухслойной стенки. При монтаже разворачивание основного рулона корпуса (первой стенки) и дополнительного (второй стенки) осуществляется одновременно. Вторая стенка, как правило, не приваривается к основному корпусу резервуара.

Для повышения устойчивости поясов корпуса используются кольца жесткости. Рядовые кольца жесткости делают из швеллеров, располагаемых полками вниз, или одиночных уголков, привариваемых к корпусу пером (рис. 2.7, а). При использовании «плавающих крыш» или понтонов рядовые кольца жесткости ставятся с наружной стороны корпуса резервуара. Сечения колец жесткости и их количество определяется расчетом (п. 3.3). Кольца жесткости рас-

полагаются на расстоянии не менее 150 мм от горизонтального сварного шва стенки резервуара.

Верхняя часть корпуса усиливается обвязочным (опорным) кольцом жесткости, которое предназначено, главным образом, для восприятия горизонтальных распорных усилий от покрытия и для обеспечения неизменяемости корпуса резервуара при ветровой нагрузке. Один из вариантов конструктивного решения верхней части корпуса резервуара при наличии кольца жесткости приведен на рис. 2.7, б. При щитовом варианте покрытия верхнее кольцо жесткости формируется в процессе монтажа крайних щитов, где наружная грань щита является частью этого кольца. Если верхнее кольцо используется в качестве обслуживающей площадки, то его ширина должна быть не менее 800 мм и иметь ограждение по внешнему периметру. В качестве опор такой площадки используются подкосы, прикрепляемые к стенке резервуара. Сечение и количество подкосов определяется расчетом.

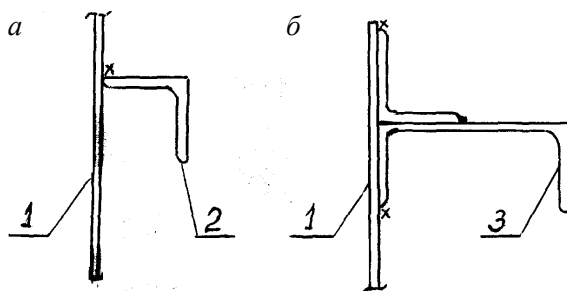


Рис. 2.7. Усиление корпуса резервуара кольцами жесткости:
1 – стенка резервуара; 2 – рядовое кольцо жесткости;
3 – обвязочное кольцо жесткости

2.3. Конструктивные решения покрытий

Покрытия резервуаров могут быть трех типов: в виде висячей тонколистовой оболочки отрицательной гауссовой кривизны (шатровые покрытия); в виде конической каркасной оболочки; в виде ребристого или ребристо-кольцевого купола (сферические покрытия). Выбор конструктивного варианта стационарного покрытия и его формы зависят от условий эксплуатации, способа изготовления и размеров резервуара.

2.3.1. Шатровые покрытия

Шатровые покрытия состоят из провисающей тонколистовой оболочки, центральной стойки и обвязочного (опорного) кольца (рис. 2.8). Угол наклона касательной к оболочке в месте ее примыкания к стенке резервуара и горизонталью (φ_0) для обеспечения стока воды не должен быть меньше 5° . Превышение центральной стойки над стенкой резервуара (h) принимается в пределах $(1/5-1/8)$ радиуса резервуара. Толщина металлической оболочки определяется расчетом (п. 3.5.1) и не должна быть меньше 4 мм без учета минусовых допусков на листовой прокат и компенсации на коррозионный износ. Соединения листов оболочки между собой осуществляются внахлест на сварке или на болтах. Величина нахлеста при сварке должна быть не менее 5-и толщин соединяемых листов и не менее 30 мм.

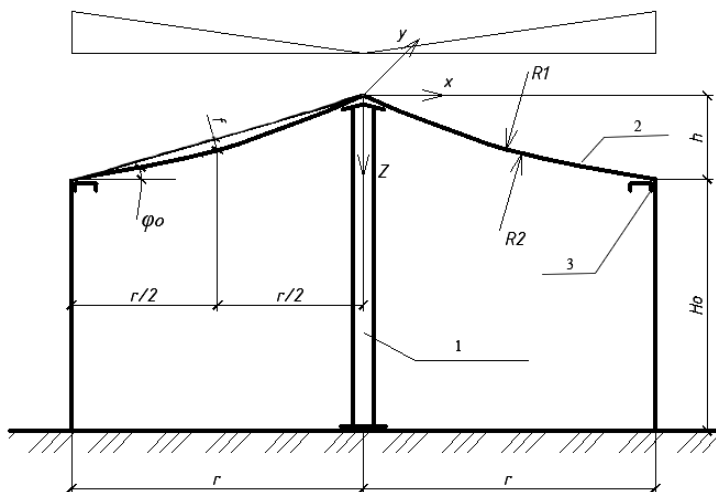


Рис. 2.8. Резервуар с шатровым (висячим) покрытием:
1 – центральная стойка; 2 – оболочка покрытия;
3 – обвязочное (опорное) кольцо

Сечение опорного кольца принимается в виде швеллера, который может быть сварным, холодногнутым или горячекатаным. При этом наружная полка швеллера должна быть размалкована на угол « φ_0 ». Опорное кольцо поставляется на монтажную площадку в виде

отдельных элементов длиной 1,5–3 м. Соединение этих элементов между собой осуществляется на сварке или с помощью болтов и листовых накладок.

Центральная стойка изготавливается из круглых труб. При этом полость трубы должна быть герметичной. Грибовидный оголовок стойки делается в виде конуса с радиусом равным $(0,05–0,1)$ радиуса резервуара (рис. 2.9).

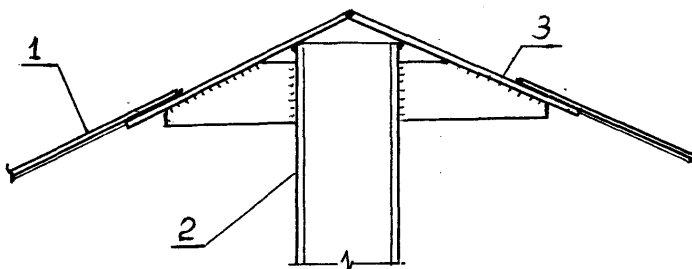


Рис. 2.9. Узел сопряжения шатрового покрытия с центральной стойкой:
1 – лист шатровой оболочки; 2 – центральная стойка; 3 – оголовок стойки

На рис. 2.9 показан узел крепления листов шатрового покрытия к оголовку центральной стойки при использовании сварных соединений. Также возможен вариант этого узла с применением болтовых соединений.

База центральной стойки имеет традиционное решение: состоит из опорной плиты и ребер. Опираение центральной стойки осуществляется на железобетонный столбчатый фундамент.

Шатровые покрытия являются наиболее экономичными по расходу металла, но при этом приходится выполнять большой объем работ на монтажной площадке по сборке таких покрытий. Шатровые покрытия рекомендуются при внутреннем давлении не более 1 кН/м^2 .

2.3.2. Конические каркасные покрытия

Конические каркасные покрытия бывают с центральной стойкой и без нее. Конические покрытия с центральной стойкой состоят из настила, прогонов настила, направленных тангенциально, радиально направленных балок, центральной стойки и обвязочного кольца (рис. 2.10). Рекомендуемое превышение центральной стойки

над обвязочным (верхним) кольцом составляет примерно 0,1 радиуса покрытия. Конические покрытия с центральной стойкой являются безраспорными.

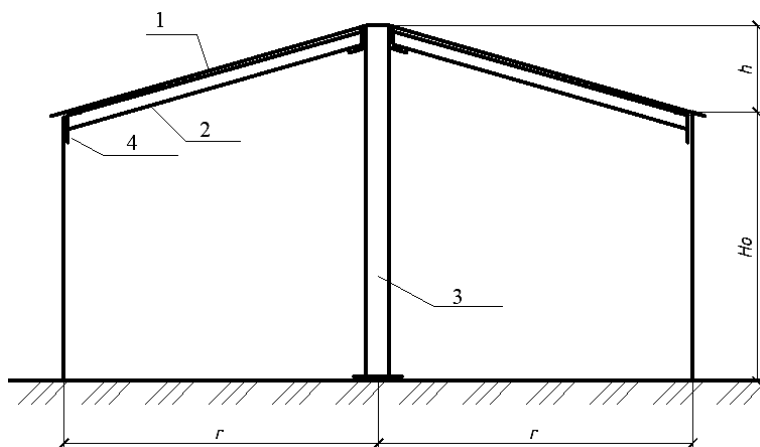


Рис. 2.10. Коническое покрытие с центральной стойкой:
1 – настил; 2 – радиальные балки; 3 – центральная стойка; 4 – опорное кольцо

С целью индустриализации и сокращения сроков монтажа, такие покрытия собираются из щитов заводского изготовления (рис. 2.11), которые состоят из радиальных балок, прогонов и листов настила.

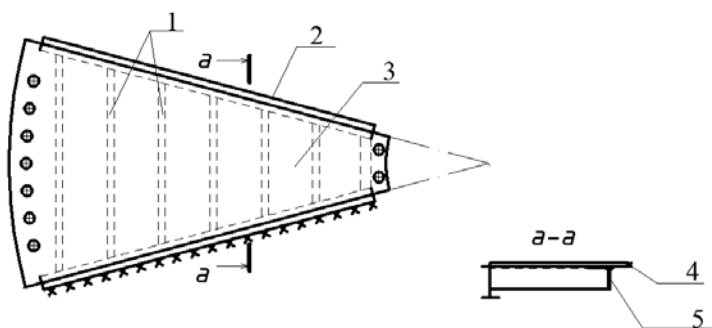


Рис. 2.11. Щит покрытия:
1 – прогоны; 2 – радиальные балки; 3, 4 – листы настила;
5 – вспомогательный (монтажный) радиальный элемент

При монтаже вспомогательный элемент щита 5 укладывается на радиальную балку смежного щита покрытия. Опорное кольцо может поставляться на монтажную площадку в виде отдельных элементов длиной 1,5–3 м или быть составной частью крайнего щита. Соединение внутри щита выполняется на сварке, а соединение щитов между собой могут быть выполнены на болтах или на сварке. По периметру резервуара щиты опираются на опорное кольцо, а в центре на центральную стойку. Узлы сопряжений щитов с опорным кольцом и с центральной стойкой могут быть оформлены на болтах или на сварке.

Рекомендуемое сечения центральной стойки – круглая труба. Опирание центральной стойки на фундамент выполняется по аналогии с предыдущим вариантом покрытия. При использовании болтовых соединений рекомендуется для компенсации неточностей изготовления и монтажа отверстия в соединяемых элементах делать овальными. Болтовые соединения, как правило, должны быть герметизированы с помощью твердеющего уплотнительного материала.

Конические покрытия без центральной стойки включают в себя: обвязочное, центральное и промежуточные кольца, радиально расположенные балки или полуфермы, вспомогательные радиально расположенные прогоны и тонколистовой настил (рис. 2.12).

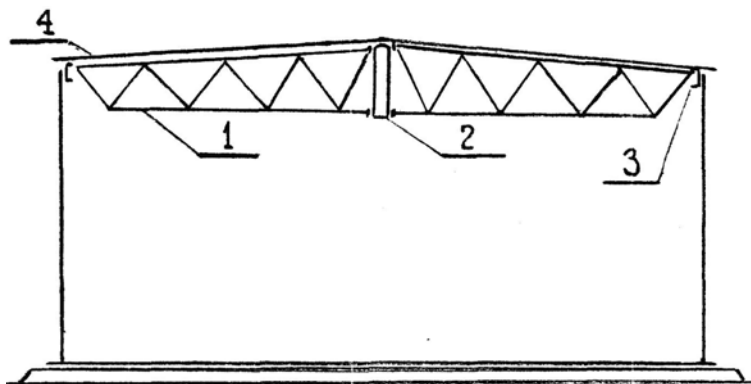


Рис. 2.12. Резервуар с коническим покрытием без центральной стойки:
1 – полуферма; 2 – центральное кольцо; 3 – обвязочное кольцо; 4 – настил

Радиально расположенные балки или полуфермы сопрягаются между собой с помощью центрального кольца и опираются по периметру резервуара на обвязочное кольцо. Для уменьшения пролета настила и, соответственно, его толщины используются промежуточные кольца и вспомогательные прогоны, которые располагаются между радиальными балками и опираются на обвязочное и промежуточные кольца.

Конические каркасные покрытия собираются из отдельных щитов (см. рис. 2.11) промышленного изготовления или поэлементно. Крайние щиты после их соединения между собой образуют обвязочное кольцо, которое воспринимает горизонтальные составляющие опорных реакций (распоры) от покрытия и передает вертикальную составляющую опорной реакции на корпус резервуара. Вертикальные усилия с покрытия могут передаваться и через вертикальные стойки, равномерно расположенные по периметру резервуара. Средние щиты опираются на промежуточное и центральное кольцо. После монтажа всех конструктивных элементов и оформления узлов сопряжений щиты образуют ребристую или, при наличии промежуточных колец, ребристо-кольцевую коническую оболочку. Конические каркасные покрытия рекомендуются для резервуаров объемом до 5 000 м³.

2.3.3. Сферические покрытия в виде ребристого или ребристо-кольцевого купола

Покрытия в виде куполов используются для резервуаров большого объема, $V = (5\ 000\text{--}100\ 000)$ м³ и при внутреннем давлении более 0,2 кН/м². Общий вид резервуара с купольным покрытием приведен на рис. 2.13. Радиус кривизны оболочки покрытия (r_c) принимается в интервале (0,8–1,5) диаметра корпуса резервуара. Купольное покрытие включает в себя: обвязочное (опорное), центральное и промежуточные кольца; радиально расположенные полуарки, прогоны и тонколистовой настил. Радиально расположенные полуарки опираются на обвязочное кольцо и на центральное кольцо (рис. 2,15, 2,16). Промежуточные кольца и прогоны опираются на полуарки. Настил приваривается поверх несущих элементов каркаса купола. Купольное покрытие, как и коническое каркасное может собираться из щитов промышленного изготовления (рис. 2.14). В этом случае

полуарки предусматриваются из двоянных швеллеров или двутавров, которые находятся в смежных щитах. После монтажа смежные щиты объединяются с помощью доборных листовых элементов (рис. 2.14).

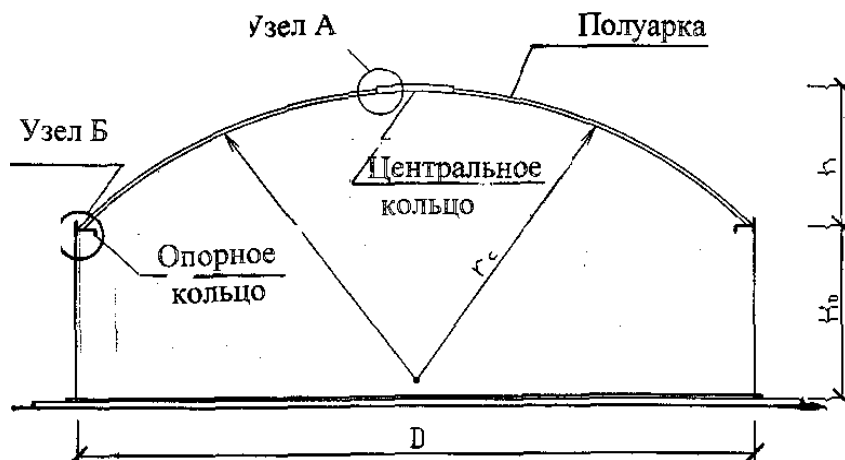


Рис. 2.13. Резервуар со сферическим покрытием (разрез)

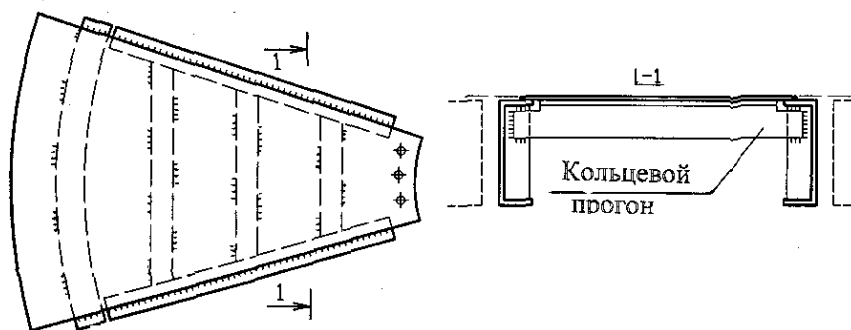


Рис. 2.14. Щит покрытия

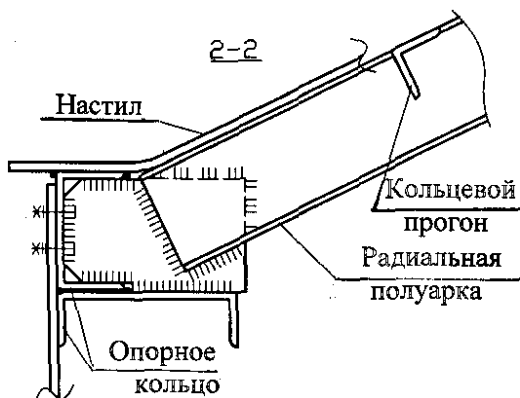


Рис. 2.15. Узел сопряжения щита покрытия со стенкой резервуара (узел Б)

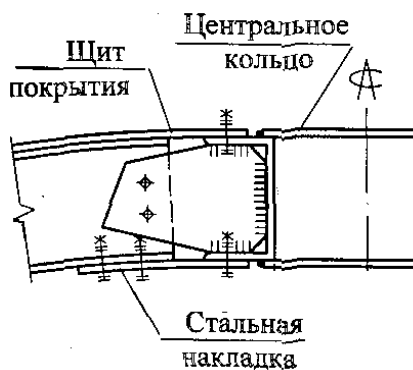


Рис. 2.16. Узел сопряжения щита покрытия с центральным кольцом (Узел А)

В некоторых резервуарах покрытие может отсутствовать, и тогда предусматривается «плавающая крыша», которая плавает на поверхности жидкости, находящейся в резервуаре (рис. 2.17).

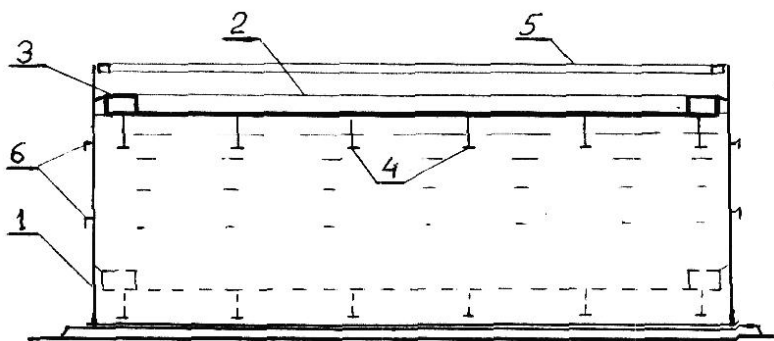


Рис. 2.17. Резервуар с плавающей крышей (с понтоном):
 1 – стенка резервуара; 2 – плавающая крыша (понтон);
 3 – короб; 4 – стойки; 5 – обвязочное кольцо;
 6 – промежуточные кольца жесткости

Основными элементами «плавающих крыш» являются герметичные короба, обеспечивающие плавучесть и стойки высотой 1,8 м для опирания плавающей крыши на днище при отсутствии жидкости в резервуаре. Стойки обеспечивают пространство между днищем и плавающей крышей, необходимое для ремонта как днища, так и самой крыши. Для распределения сосредоточенных нагрузок, передаваемых плавающей крышей на днище резервуара, в местах опирания стоек к днищу привариваются стальные подкладки толщиной равной удвоенной толщине днища и площадью в 2 раза превышающей площадь опорной плиты стойки.

Удаление воды с плавающих крыш производится через гибкие шланги, закрепленные одним концом к крыше, а другим – к нижней части корпуса резервуара. При отсутствии в резервуаре жидкости несущая способность плавающей крыши должна быть достаточной для восприятия нормативной нагрузки равной $1,5 \text{ кН/м}^2$. Между плавающей крышей и стенкой резервуара имеется зазор, равный, как правило, 200–275 мм, который заполняется уплотняющим затвором для предотвращения потерь от испарений хранимой жидкости (рис. 2.18). Резервуары с плавающей крышей сокращают потери хранимых жидкостей на 70–80 % по сравнению с обычными резервуарами (со стационарными крышами и без специальных устройств по предотвращению потерь хранимых жидкостей).

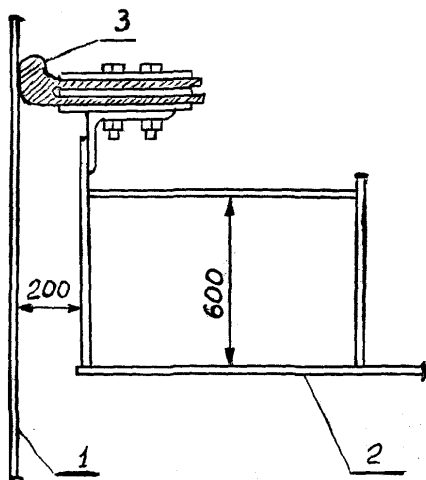


Рис. 2.18. Уплотняющий затвор:
1 – стенка резервуара; 2 – плавающая крыша; 3 – уплотнитель

Однако в снежных районах применение «плавающих крыш» становится затруднительным. Рекомендуется резервуары с плавающими крышами применять при снеговой нагрузке не более $1,5 \text{ кН/м}^2$. При больших снеговых нагрузках используются резервуары со стационарными покрытиями, а для повышения эффективности борьбы с потерями применяются понтоны, которые по конструктивному решению подобны «плавающим крышам». Несущая способность понтона на плаву или на стойках (при отсутствии хранимого продукта) должна быть достаточной для восприятия сосредоточенной нагрузки равной 2 кН , приложенной в любой точке понтона. Применение понтонов увеличивает расход металла на 15% .

«Плавающие крыши» и понтоны оборудуются вакуумными и предохранительными клапанами, соответственно, для предотвращения образования вакуума при опорожнении резервуара и для выпуска воздуха, заключенного между дном и «плавающей крышей» (понтон), при наполнении резервуара. «Плавающие крыши» и понтоны изготавливаются из стальных листов толщиной $4\text{--}5 \text{ мм}$. Высота вертикальных стенок коробов $500\text{--}800 \text{ мм}$. Все соединения листов должны быть герметичными.

Как правило, «плавающие крыши» и понтоны применяются для резервуаров, предназначенных для хранения легкоиспаряющихся жидкостей и при их большой оборачиваемости.

3. РАСЧЕТ РЕЗЕРВУАРОВ

3.1. Нагрузки

Нагрузки, учитываемые при расчете резервуаров:

1. Давление хранимого вещества (g).
2. Атмосферные воздействия: ветер (q_w) и снег (q_s).
3. Собственный вес металлоконструкций покрытия (g_n) и стенки ($g_{ст}$).
4. Избыточное давление в газовом пространстве резервуара (p_n).
5. Отрицательное давление внутри корпуса резервуара, которое может быть обусловлено ветровым потоком (p_v) или технологическим вакуумом (p_0).

Расчетные значения нагрузок определяются по формулам приведенным ниже.

Внутреннее давление на пояс стенки резервуара определяется по следующей формуле:

$$g = \rho \gamma_{f1} x + p_n \gamma_{f2}, \quad (3.1)$$

где ρ – плотность хранимой жидкости в кН/м^3 ;

γ_{f1} – коэффициент надежности по нагрузке ($\gamma_{f1} = 1,1$);

x – расстояние от верхней точки хранимого вещества до нижней точки рассчитываемого пояса;

p_n – избыточное давление (кН/м^2). Для резервуаров без покрытия $p_n = 0$;

γ_{f2} – коэффициент надежности по нагрузке (для избыточного давления $\gamma_{f2} = 1,2$).

Если предусматривается проведение гидравлических испытаний, то вместо плотности хранимой жидкости следует использовать плотность воды.

Эпюра ветрового давления на внешнюю поверхность стенки резервуара приведена на рис. 3.1, 3.2.

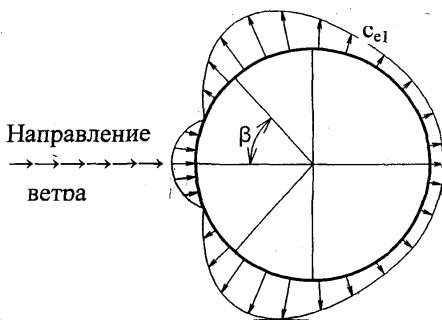


Рис. 3.1. Распределение ветрового давления по периметру резервуара

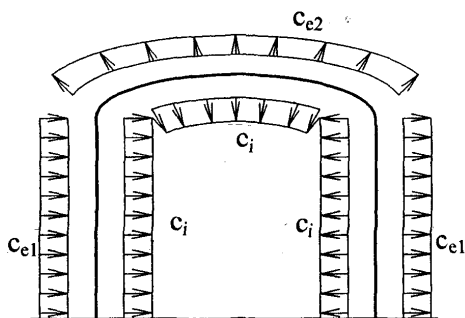


Рис. 3.2. Распределение ветрового давления по стенке и покрытию резервуара

Значение ветрового давления определяется по формуле

$$q_w = w_0 \gamma_{\beta} k c_{e1}, \quad (3.2)$$

где w_0 – нормативное значение ветрового давления, зависящее от района строительства (кН/м^2);

γ_{β} – коэффициент надежности по нагрузке;

k – коэффициент, учитывающий тип местности и изменение ветрового давления по высоте (рекомендуется определять ветровое давление для местности типа А и на высоте, соответствующей нижней точке рассчитываемого пояса).

c_{e1} – аэродинамический коэффициент:

$$c_{e1} = c_{\beta} k_1, \quad (3.3)$$

где c_{β} – определяется по табл. 3.1 в зависимости от угла « β » (см. рис. 3.1).

Таблица 3.1

Значения коэффициента « c_{β} »

β	0°	30°	60°	70°	90°	120°	150°	180°
c_{β}	+1	+0,4	-1,2	-1,3	-1,0	-0,4	-0,4	-0,4

При $c_{\beta} \geq 0$ $k_1 = 1$. При отрицательных значениях c_{β} коэффициент k_1 определяется по табл. 3.2 в зависимости от соотношения высоты резервуара (H) и диаметра (D).

Таблица 3.2

Значения коэффициента « k_1 »

H/D	0,2	0,5	1
k_1	0,8	0,9	0,95

Из таблицы следует, что наибольшее растягивающее напряжение в стенке резервуара следует определять при аэродинамическом коэффициенте для $\beta = 70^\circ$, а при определении сжимающих напряжений для $\beta = 0^\circ$.

Отрицательное ветровое давление на внутреннюю поверхность стенки резервуаров без покрытий или при не герметичных покрытиях (допускающих разрежение) определяется по формуле

$$p_{в} = w_0 \gamma_{f4} k c_i \quad (3.4)$$

где γ_{f4} – коэффициент надежности по нагрузке для ветрового вакуума ($\gamma_{f4} = 1,2$);

k – определяется на высоте равной высоте резервуара;

c_i – аэродинамический коэффициент, определяемый по табл. 3.3 в зависимости от соотношения высоты и диаметра резервуара.

Таблица 3.3

Значения коэффициента « c_i »

H/D	0,17	0,25	0,5	1
c_i	-0,5	-0,55	-0,7	-0,8

При определении ветровой нагрузки на покрытие (см. рис. 3.2) аэродинамический коэффициент (c_{e2}) принимается по табл. 3.4.

Таблица 3.4

Значения коэффициента « c_{e2} »

H/D	1/6	1/3	≥ 1
c_{e2}	-0,5	-0,6	-0,8

Приведенные в табл. 3.4 значения аэродинамического коэффициента применимы для плоских покрытий ($\alpha = 0$) и конических покрытий при $\alpha \leq 5^\circ$, а также для сферических покрытий при $H/D \leq 0,1$.

Распределение снеговой нагрузки в зависимости от очертания покрытия приведено на рис. 3.3.

Значения снеговой нагрузки на 1 м^2 определяются по формуле

$$q_s = S_0 \gamma_{f5} \mu, \quad (3.5)$$

где S_0 – нормативное значение веса снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности земли, принимаемое в зависимости от снегового района (кН/м^2);

γ_{f5} – коэффициент надежности по снеговой нагрузке ($\gamma_{f5} = 1,6$);
 μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова на кв. метр горизонтальной поверхности земли к снеговой нагрузке на покрытие резервуара.

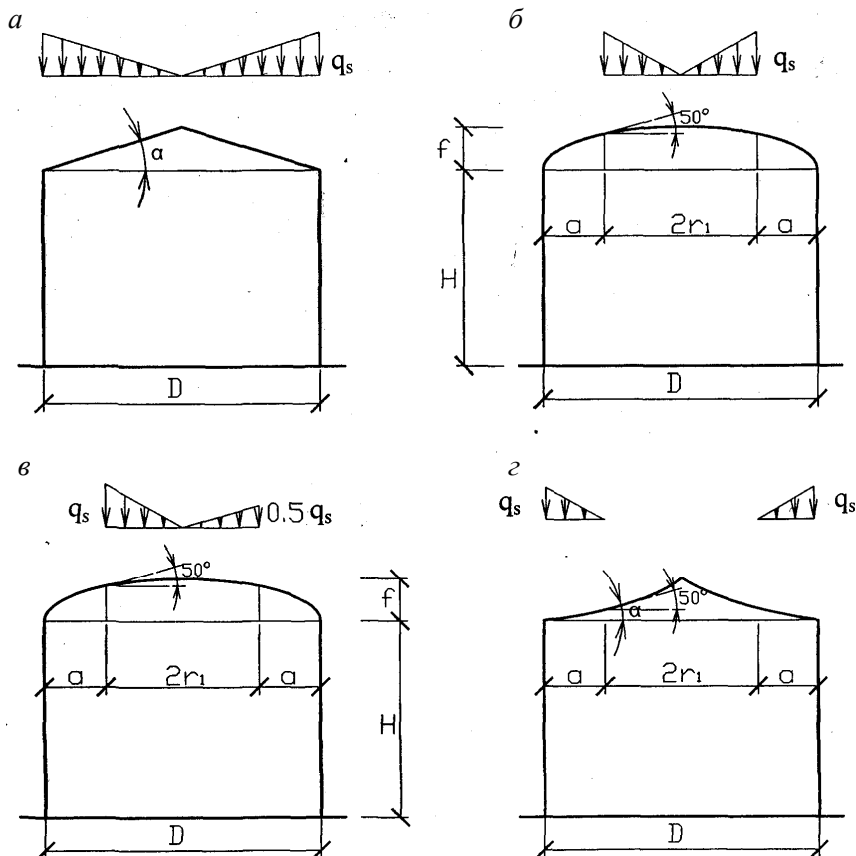


Рис. 3.3. Схемы распределения снеговой нагрузки

Для конических и шатровых покрытий при $\alpha \leq 25^\circ$ (см. рис. 3.3, а, г) $\mu = 1$. Для сферических покрытий $\mu = D/8f$, но не более 1 и не меньше 0,4. Если для сферического покрытия отношение $f/D \geq 1/8$, то распределение снеговой нагрузки принимается по схеме, представленной на рис. 3.3, в, и коэффициент « μ » определяется по табл. 3.5.

Таблица 3.5

Значения коэффициента «μ»

f/D	1/8	1/6	$\geq 1/5$
μ	1,6	2,0	2,2

3.2. Расчет стенки резервуара

3.2.1. Расчет на прочность

До определения толщины стенки необходимо назначить высоту резервуара и ширину поясов. Стенка резервуара рассматривается как цилиндрическая оболочка. Предварительно толщина каждого пояса стенки резервуара определяется по наибольшему растягивающему напряжению в кольцевом направлении

$$t \geq \frac{(g + q_w)r\gamma_n}{R_y\gamma_c}, \quad (3.6)$$

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

r – радиус стенки резервуара;

g и q_w – определяются по формулам (3.1), (3.2) для нижней точки каждого пояса;

γ_n – коэффициент надежности по ответственности равный 1,0 для резервуаров 3-го класса; 1,05 для резервуаров 2-го класса; 1,1 для резервуаров 1-го класса.

К 3-му классу относятся резервуары объемом до 500 м³, резервуары объемом от 500 м³ до 1 000 м³ относятся ко второму классу и резервуары объемом 1 000 м³ и более, а также резервуары объемом 500 м³ и более, расположенные на берегах водоемов или в городских застройках относятся к первому классу.

Для получения наибольшего растягивающего усилия в стенке резервуара ветровую нагрузку « q_w » следует определять для угла (β) равного 70° (см. рис. 3.1).

Полученные значения толщины округляются в большую сторону до значений листового проката. Рекомендуется принимать толщину стенки резервуара не менее 4 мм. После назначения толщины следует проверить прочность стенки по наибольшим меридиональным напряжениям в каждом поясе и прочность по приведенным напряжениям от совместного действия нагрузок также в каждом поясе стенки резервуара.

Проверка по наибольшим меридиональным напряжениям

$$\sigma_{\text{м}} = \frac{(g_{\text{п}} + 0,95 p_0 \gamma_{f6})r}{2t} + \frac{0,9P_s}{2\pi r t} + \frac{g_{\text{ст}}}{t} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n. \quad (3.7)$$

Для резервуаров без покрытий меридиональные напряжения создаются только собственным весом стенки ($g_{\text{ст}}$).

Проверка по приведенным напряжениям:

$$\sqrt{\sigma_{\text{к}}^2 - \sigma_{\text{к}} \sigma_{\text{м}} + \sigma_{\text{м}}^2} \leq 1,15 R_y \gamma_c / \gamma_n, \quad (3.8)$$

где $\sigma_{\text{к}}$ – растягивающее кольцевое напряжение, а $\sigma_{\text{м}}$ – соответствующие сжимающее меридианальное напряжение ($\sigma_{\text{к}}$ и $\sigma_{\text{м}}$ подставляются в (8) со своим знаком):

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{(0,95g + 0,9q_w)r}{t} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n, \quad (3.9)$$

$$\sigma_{\text{м}} = \frac{(g_{\text{п}} - 0,95 p_u \gamma_{f2})r}{2t} + \frac{0,9P_s}{2\pi r t} + \frac{g_{\text{см}}}{t} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n, \quad (3.10)$$

Напряжения $\sigma_{\text{к}}$ и $\sigma_{\text{м}}$ определяются для нижней точки каждого пояса стенки резервуара. В формулах (3.7) и (3.10) используются следующие величины:

$g_{\text{п}}$ – расчетная нагрузка от собственной массы покрытия резервуара (кН/м^2). Для резервуара без покрытия $g_{\text{п}} = 0$;

P_s – расчетная суммарная снеговая нагрузка на покрытия (кН), которая определяется с учетом распределения снеговой нагрузки по покрытию (см. рис. 3.3):

– при равномерном распределении снеговой нагрузки по покрытию (см. рис. 3.3, а)

$$P_s = q_s \pi r^2;$$

– для сферического покрытия (см. рис. 3.3, б)

$$P_s = q_s \pi r_1^2;$$

– для шатрового покрытия (см. рис. 3.3, в)

$$P_s = q_s \pi (r^2 - r_1^2);$$

p_0 – технологический вакуум (кН/м²);

$\gamma_{\text{ж}}$ – коэффициент надежности по нагрузке (для вакуума $\gamma_6 = 1,2$);

$g_{\text{ст}}$ – расчетная нагрузка от вышележащей части стенки резервуара на единицу длины окружности резервуара (кН/м):

$$g_{\text{ст}} = \gamma \gamma_{\text{ж}} \sum t_i h_{\text{п}}, \quad (3.11)$$

где γ – плотность металла (78,5 кН/м³);

$\gamma_{\text{ж}}$ – коэффициент надежности по нагрузке (для нагрузки, создаваемой собственным весом металлических конструкций ($\gamma_{\text{ж}} = 1,05$);

$\sum t_i$ – сумма толщин поясов, расположенных выше рассматриваемой точки;

$h_{\text{п}}$ – ширина пояса стенки резервуара.

При определении кольцевых и меридиональных напряжений использованы следующие коэффициенты расчетных сочетаний нагрузок: 0,95 – для временных длительных нагрузок и 0,9 – для кратковременных нагрузок. В случае, если условие (3.7) или (3.8) не выполняется, следует увеличить толщину пояса.

После выполнения проверки прочности по формулам (3.7) и (3.8) толщину поясов стенки резервуара следует увеличить с учетом минусового допуска на прокат (Δ) и с учетом коррозионного износа (c):

$$T = t + \Delta + c. \quad (3.12)$$

Указанное увеличение толщины не требуется делать, если выполняется следующее условие:

$$\frac{R_y \gamma_c}{\sqrt{\sigma_k^2 - \sigma_k \sigma_M + \sigma_M^2}} \geq 1 + \frac{\Delta + c}{t}. \quad (3.13)$$

3.2.2. Расчет на устойчивость

Потеря устойчивости стенки корпуса резервуара может произойти в результате отдельного или совместного действия сжимающих кольцевых (горизонтальных) и меридиональных (вертикальных) напряжений. Проверочные формулы при отдельном действии кольцевых и меридиональных напряжений имеют вид;

$$\sigma_k \leq \sigma_{срк} \gamma_c; \quad \sigma_M \leq \sigma_{срм} \gamma_c. \quad (3.14)$$

Тоже при совместном действии кольцевых и меридиональных напряжений

$$\frac{\sigma_k}{\sigma_{срк}} + \frac{\sigma_M}{\sigma_{срм}} \leq \gamma_c. \quad (3.15)$$

Сжимающее кольцевое напряжение для резервуара с покрытием определяется:

$$\sigma_k = (0,9q_w + 0,95p_o \gamma_{f6})r/t, \quad (3.16)$$

где q_w определяется по формуле (3.2) при $c_{e1} = 0,5$, а коэффициент «к» принимается для верхней точки стенки резервуара, т. е. локальное сжатие стенки с наветренной стороны (в зоне угла $\beta = \pm 37,5^\circ$ см. рис. 3.1) заменяется сжатием стенки по всему периметру резервуара. При этом интенсивность ветрового давления уменьшается в два раза. Для резервуаров без покрытий или с не герметичными покрытиями в формуле (3.17) вместо технологического вакуума ($p_o \gamma_{f6}$) используется отрицательное ветровое давление на внутреннюю поверхность стенки резервуара (p_v), определяемое по формуле (3.4).

Сжимающее меридиональное напряжение (σ_M) в формулах (3.14) и (3.15) определяется по формуле (3.7). Критическое кольцевое напряжение вычисляется по формуле

$$\sigma_{crk} = 0,55E \frac{r}{H_r} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{3/2}, \quad (3.17)$$

где H_r – редуцированная высота резервуара:

$$H_r = \sum_{i=1}^n h_{\text{ш}} \left(\frac{t_{\text{min}}}{t_i}\right)^{5/2}, \quad (3.18)$$

где n – количество поясов;

t_i – толщина пояса с номером « i » (нумерация поясов сверху вниз).

При постоянной толщине поясов стенки резервуара редуцированная высота равна высоте резервуара (H). Критическое меридиональное напряжение вычисляется по формуле

$$\sigma_{срм} = \frac{cEt}{r}, \quad (3.19)$$

где c – коэффициент, определяемый по табл. 3.6.

Таблица 3.6

Значения коэффициента « c »

r/t	100	200	300	400	600	800	1 000	1 500	2 500
c	0,22	0,18	0,16	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06

Если в процессе проверки устойчивости стенки резервуара оказывается, что $\sigma_M > \sigma_{срм}$, то следует увеличить толщину поясов стенки (повышение устойчивости в меридиональном направлении обеспечивается только за счет увеличения толщины поясов стенки). Если оказывается, что $\sigma_k > \sigma_{crk}$ или не выполняется условие (3.15) при

$\sigma_M < \sigma_{сгм}$, то также нужно увеличить толщину поясов стенки или предусмотреть промежуточные кольца жесткости. Также возможен комбинированный вариант: увеличивается толщина стенки и предусматривается кольцо жесткости. Расположение колец жесткости а также их расчет на прочность и устойчивость приведены в п. 3.3.

3.3. Расчет промежуточного и опорного (верхнего) колец жесткости

Расположение первого сверху промежуточного кольца жесткости определяется в следующей последовательности:

1) из уравнения (3.15) при известных σ_k , σ_M и $\sigma_{сгм}$ определяется требуемое значение $\sigma_{срк}$;

2) из формулы (3.17) определяется H_{rmax} ;

3) из равенства (3.18) определяется номер пояса (n_1), при котором правая часть (3.17) становится больше « H_{rmax} » и тогда первое кольцо жесткости предусматривается на поясе с номером « n_1 » (нумерация колец сверху вниз).

Кольцо жесткости следует располагать в пределах ширины пояса с номером n_1 . Расстояние от нижней кромки пояса с номером (n_1) до кольца жесткости можно определить по формуле

$$h_1 = (H_{r1} - H_{rmax}) \left(\frac{t_k}{t_{min}} \right)^{5/2}, \quad (3.20)$$

где H_{r1} – редуцированная высота верхней части стенки, включая пояс с номером (n_1), определяемое по формуле (3.20);

t_k – толщина пояса с номером (n_1).

Расположение следующего кольца жесткости определяется по аналогичной схеме, при этом за верхнюю точку принимается не верх резервуара, а верх пояса промежуточным кольцом жесткости, а в качестве t_{min} принимается толщина пояса с промежуточным кольцом жесткости.

При ветровом давлении в кольцах жесткости возникают изгибающие моменты (M), поперечные силы (Q) и осевая сила (N):

$$M = k_1 q_w r^2 a, \quad (3.21)$$

$$Q = k_2 q_w r a; \quad (3.22)$$

$$N = (k_3 0,9 q_w + q_l) r a, \quad (3.23)$$

где q_w – давление ветра на уровне кольца определяется по формуле (3.2);

a – ширина грузовой площади;

$k_1; k_2; k_3$ – коэффициенты, определяемые по табл. 3.7.

Знак при k_1 указывает, какие волокна растягиваются: «+» – внутренние, «-» – наружные. Знак при k_3 указывает на растяжение, если «+» и на сжатие, если «-».

Таблица 3.7

Значения коэффициентов k_1, k_2, k_3

Углы β от- ношение H/D	Углы β							
	0°	30°	45°	60°	90°	120°	150°	180°
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Значения коэффициента k_1								
1	0,352	0,154	-0,033	-0,2	-0,308	-0,1	0,154	0,252
1/3	0,23	0,107	-0,017	-0,126	-0,213	-0,083	0,106	0,187
1/6	0,181	0,081	-0,013	-0,098	-0,161	-0,066	0,081	0,149
Значения коэффициента k_2								
1	0	-0,82	-0,93	-0,8	-0,153	0,266	0,217	0
1/3	0	-0,635	-0,768	-0,714	-0,361	0,007	0,082	0
1/6	0	-0,521	-0,622	-0,596	-0,323	-0,048	0,051	0
Значения коэффициента k_3								
1	-0,367	-0,087	0,195	0,488	0,893	0,995	0,963	0,945
1/3	-0,755	-0,514	-0,261	0,027	0,536	0,834	0,957	0,983
1/6	-0,746	-0,545	-0,336	-0,095	0,345	0,617	0,739	0,776

При определении наибольшего растягивающего усилия: $q_l = 0,95g$, где «g» определяется по формуле (3.1), а значения «M» и «N» следует определять дважды при $\beta = 75^\circ$ и $\beta = 90^\circ$ с тем, чтобы определить наибольшее растяжение.

Для получения наибольшего сжимающего напряжения коэффициенты k_1 ; k_3 и c_β (3.3) принимаются для $\beta = 0$ (см. рис. 3.1). При этом вместо давления жидкости (g) следует учитывать вакуум технологический при герметичном корпусе (p_0) или вакуум, обусловленный ветровым отсосом при не герметичном корпусе (p_b) и тогда соответственно $q_1 = 0,95p_0\gamma_{f\beta}$ или $q_1 = 0,9 p_b$ (p_b – определяется по формуле (3.4).

Проверка прочности по нормальным напряжениям выполняется по формуле

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{W_k} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n. \quad (3.24)$$

При определении геометрических характеристик кольца в расчетное сечение включается часть стенки (рис. 3.4): $0,65t\sqrt{E/R}$ с каждой стороны от кольца и тогда: $A = A_k + 1,3t^2 \sqrt{E/R}$, где A_k – площадь сечения кольца жесткости.

Поперечная сила используется для расчета сварных швов прикрепляющих кольцо жесткости к стенке резервуара.

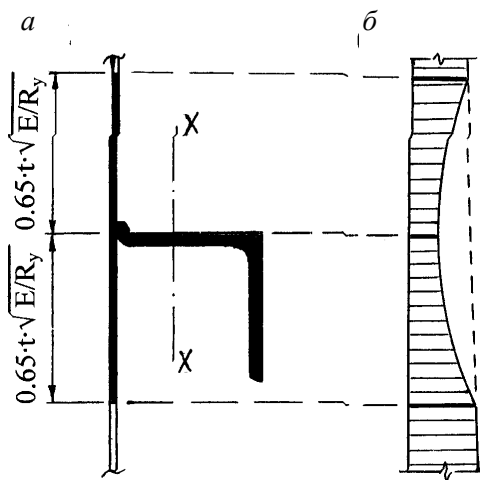


Рис. 3.4. Расчетное сечение кольца жесткости (а) и эпюра кольцевых напряжений вблизи кольца жесткости (б)

Устойчивость колец жесткости проверяется по формуле

$$N_k \leq N_{cr}, \quad (3.25)$$

где $N_k = (0,95p_0\gamma_{f6} + 0,9q_w)ra$ или при отсутствии технологического вакуума ($p_0 = 0$): $N_k = 0,9(p_b + q_w)ra$;

q_w определяется по формуле (3.2) при $C_{e1} = 0,5$ при этом коэффициент «к» определяется при высоте равной высоте резервуара;

p_b – ветровое давление на внутреннюю поверхность резервуара без покрытий или при не герметичных покрытиях; p_b определяется по формуле (3.4)

Критическая сила определяется по формуле:

$$N_{cr} = 3EI_x/i_k^2, \quad (3.26)$$

где I_x – момент инерции сечения кольца с учетом примыкающей части стенки относительно вертикальной оси. Допускается определять I_x относительно внутренней поверхности стенки;

i_k – радиус инерции кольца ($i_k = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$).

В зоне колец жесткости в стенке резервуара возникает краевой эффект, обусловленный разностью деформаций стенки без кольца жесткости и стенки, усиленной кольцом жесткости. Краевой эффект здесь сопровождается появлением изгибающего момента (M_1) и уменьшением кольцевых напряжений в стенке резервуара (рис. 3.4). Изгибающий момент определяется по формуле

$$M_1 = \frac{p}{4m_{ct}}, \quad (3.27)$$

$$\text{где } p = \frac{g \cdot S}{0,5m_{ct} + t / A_k}; \quad (3.28)$$

g – определяется на расстояние от верхнего уровня хранимой жесткости до оси кольца (3.1):

$$m_{cm} = \sqrt[4]{\frac{2,73}{r^2 t^2}}. \quad (3.29)$$

Наибольшее дополнительное меридианальное напряжение в стенке в зоне краевого эффекта шириной $S = 0,6\sqrt{rt}$ определяется по формуле

$$\sigma_{mg} = 6M_1 / t^2. \quad (3.30)$$

Дополнительные меридианальные напряжения учитываются при проверке прочности стенки резервуара в вертикальном направлении. Кольцевые напряжения в стенке – в зоне краевого эффекта:

$$\sigma_k = \frac{pr}{t + A_k / 2S}. \quad (3.31)$$

Поперечная сила в зоне краевого эффекта

$$Q = p/2. \quad (3.32)$$

Поперечная сила учитывается при расчете сварного соединения кольца жесткости и стенки резервуара

$$k_f = \frac{QS_c \gamma_n}{2I\beta_f R_{wf} \gamma_{wf}}, \quad (3.33)$$

где S_c – статический момент сдвигаемой части стенки резервуара, включаемой в расчетное сечение кольца жесткости (см. выше).

3.4. Расчет сопряжения стенки корпуса с днищем

Конструктивное решение узла сопряжения стенки корпуса резервуара и днища приведено на рис. 2.9. Значение наибольшего изгибающего момента в стенке, примыкающей к днищу, можно принять равным пластическому моменту, вычисленному по толщине крайков:

$$M = M_{пл} = R_y \cdot \frac{1t_{окр}^2}{b} \cdot c_1, \quad (3.34)$$

где $t_{окр}$ – толщина крайков;

$$c_1 = 1,47 \cdot \sqrt{1 - (\tau / R_s)^2}, \quad (3.35)$$

τ – определяется по формуле (3.36) (см. ниже).

В зоне сопряжения стенки корпуса с днищем кольцевые напряжения с приближением к днищу будут уменьшаться до нуля. Проверка прочности в нижней части стенки по приведенному напряжению выполняется по следующей формуле

$$\sqrt{\sigma_k^2 - \sigma_k \cdot \sigma_m + \sigma_m^2 + 3\tau^2} \leq 1,15R_y \gamma_c; \quad (3.36)$$

где

$$\tau = (g + q_w) / t,$$

а σ_k определяется по формуле (3.9).

При определении σ_k и τ ветровая нагрузка вычисляется при $\beta = 70^\circ$. При определении « σ_k » принимается $x = x_{\max} - S$, где S – ширина изгибной зоны ($S = 0,6 \sqrt{rt}$). При определении « τ » $x = x_{\max}$ (x_{\max} – расстояние от поверхности хранимой жидкости до днища). Меридиональные напряжения вычисляются по следующей формуле

$$\sigma_m = \frac{(g_{\Pi} - 0,95 p_{\Pi} \gamma_{f2})r}{2t} + \frac{0,9 P_s}{2\pi r t} + \frac{g_{ст}}{t} + \frac{M_6}{lt^2} \leq R_y \gamma_c. \quad (3.37)$$

В запас прочности предполагается, что напряжения σ_k , σ_m и τ действуют в одном сечении.

3.5. Расчет покрытий (крыш) резервуаров

Как было отмечено выше, покрытия резервуаров могут быть трех типов:

- а) в виде тонколистовой металлической оболочки отрицательной гауссовой кривизны (шатровые покрытия);
- б) в виде каркасной конической оболочки (с центральной стойкой или без центральной стойки);
- в) в виде ребристого или ребристо-кольцевого купола.

3.5.1. Расчет шатровых покрытий (см. рис. 2.8)

Поверхность шатрового покрытия описывается следующим уравнением:

$$Z = (x^2 + y^2)^{1/2} \left\{ \frac{h}{r} + \frac{8f}{3r} \left[1 - \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right] \right\}, \quad (3.38)$$

где $r = 1.01 \cdot r$ при $x = r$; $Z = h$; $\varphi_0 = 0$

Направления осей и обозначения см. рис. 2.8. Для обеспечения внешнего водоотвода при $\varphi_0 \geq 5^\circ$ должно выполняться следующее условие:

$$f \leq \frac{3h}{16} \left(1 - 0,0875 \frac{r}{h} \right) \quad (3.39)$$

Радиус кривизны меридионального сечения

$$R_1 = \frac{[1 + (z')^2]^{3/2} r^3}{16fx}, \quad (3.40)$$

где

$$z' = tgr = \frac{h}{r} + \frac{8f}{3r} \left[1 - 3 \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right]. \quad (3.41)$$

Радиус кривизны кольцевого сечения

$$R_2 = x \sin \varphi \frac{x \sqrt{1 + tg^2 \varphi}}{tg \varphi} \quad (3.42)$$

где φ – угол между касательной к поверхности и осью «х».

Погонное меридиональное усилие в шатровой оболочке в месте примыкания к оголовку центральной стойки

$$N_1^a = \frac{q(r^2 - r_0^2)}{2r_0 \sin \varphi_B}, \quad (3.43)$$

где q – расчетная вертикальная нагрузка на 1 м^2 горизонтальной поверхности.

r_0 – радиус оголовка центральной стойки;

φ_B – угол между осью «х» и касательной в месте примыкания шатровой оболочки к оголовку стойки.

Кольцевое усилие в шатровой оболочке

$$N_2 = (q \cos \varphi - \frac{N_1}{R_1}) R_2 \quad (3.44)$$

Синус и косинус в (3.40) и (3.42) определяются через тангенс

$$\sin \varphi = tg \varphi / \sqrt{1 + tg^2 \varphi}; \quad \cos \varphi = 1 / \sqrt{1 + tg^2 \varphi}; \quad (3.45)$$

Меридиональное усилие в месте примыкания шатровой оболочки к опорному кольцу

$$N_1^n = N_1^B \frac{r_0 \cos \varphi_B}{r \cos \varphi_0} \quad (3.46)$$

Для определения усилия « N_1 » в промежуточных сечениях следует в формулу (3.46) подставлять соответствующие значения ординаты «х» вместо « r_0 » и соответствующее значение « φ » вместо « φ_B ».

На усилие N_1^n рассчитывается присоединение листов шатровой оболочки к опорному кольцу. Опорное кольцо рассчитывается на устойчивость в горизонтальной плоскости

$$N_1^n r_k \leq N_{cr} = \frac{3EI}{r_k^2} \quad (3.47)$$

где r_k – радиус опорного кольца;

I – момент инерции сечения кольца относительно вертикальной оси.

Стыки элементов опорного кольца также рассчитываются на усилие: $N_1^n r_k$.

Вертикальное усилие на центральную стойку:

$$F = N_1^B 2\pi r_0 \sin \varphi_B \quad (3.48)$$

Центральная стойка рассчитывается на устойчивость, как центрально сжатый элемент. Соединения листов, образующих шатровое покрытие в меридиональном направлении рассчитываются на усилие N_1 и в кольцевом направлении на усилие N_2 (N_1 и N_2 – усилия на единицу ширины (длины) шатровой обочины. При использовании болтовых соединений рекомендуется болты располагать в два ряда.

3.5.2. Расчет конических каркасных покрытий с центральной стойкой (см. рис. 2.10)

Коническое покрытие с центральной стойкой является безраспорным.

Радиальные балки рассчитываются как однопролетные шарнирно опертые балки на действие постоянной нагрузки (собственный вес покрытия) (g_n), снеговой нагрузки (q_s) и вакуума (p_0 или p_B). Ветровая нагрузка на покрытие, а также нагрузка от избыточного давления, как правило, не учитывается. Вдоль пролета радиальной балки нагрузка распределяется по закону треугольника. Прогонь настила также рассчитывается по балочной схеме. Пролетом прогонов настила является расстояние между радиальными балками.

Если отношение пролета настила к его толщине находится в интервале 50–300, то расчетная схема настила – это жесткая нить ($EI \neq 0$) на двух неподвижных опорах. Толщина настила в этом случае определяется из условия жесткости

$$t_n = \ell_n / l \left[\frac{4n_0}{15} \left(1 - \frac{72E_n}{n_0^4 q_n} \right) \right], \quad (3.49)$$

где ℓ_n – пролет настила, равный расстоянию между прогонами настила;

n_0 – предельное отношение пролета к прогибу (как правило, назначается равным 150 или 200);

$q_n = g_{nn} + S_0\mu$ – нормативная нагрузка на 1 м^2 , включающая собственный вес покрытия (g_{nn}) и снега ($S_0\mu$);

$E_{ц}$ – цилиндрический модуль деформаций:

$$E_{ц} = \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad (3.50)$$

ν – коэффициент Пуассона.

Рекомендуемая толщина настила 3–5 мм. После назначения толщины настила его следует проверить на прочность

$$\frac{H}{A} + \frac{M}{W} \leq R_y \gamma_c, \quad (3.51)$$

где A , W – площадь сечения и момент сопротивления настила шириной 1 м;

H – распор:

$$H = \pi^2 EI a / \ell_n^2; \quad (3.52)$$

M – изгибающий момент:

$$M = M_{\bar{\sigma}} / (l + \lambda), \quad (3.53)$$

где $M_{\bar{\sigma}}$ – изгибающий момент, определяемый как для однопролетной балки.

Параметр « a » определяется из кубического уравнения

$$a(1 + a)^2 = 3f_{\bar{\sigma}}^2 / t_n^2, \quad (3.54)$$

где $f_{\bar{\sigma}}$ – прогиб настила, определяемый как для однопролетной балки.

Прогиб настила определяется через балочный прогиб

$$f = \frac{f_{\bar{\sigma}}}{1 + \alpha}. \quad (3.55)$$

При этом отношение ℓ_n / f должно быть равно или больше « n_0 »

Если отношение пролета настила к его толщине превышает 300, то настил рассчитывается как гибкая нить ($EI = 0$).

Крепление настила к прогонам настила рассчитывается на усилие « H ». Все усилия (H, M) определяются на ширину настила равную 1 м.

Обвязочное кольцо рассчитывается по аналогии с расчетом рядового кольца жесткости (п. 3.3). При этом усилия определяются от ветровой нагрузки, избыточного давления и вакуума (технологического или ветрового).

3.5.3. Расчет конических каркасных покрытий без центральной стойки (см рис 2.12)

Несущими конструктивными элементами такого покрытия являются радиально расположенные балки или фермы, тангенциально расположенные прогоны, центральное и обвязочное кольца и настил. Сопряжения радиальных элементов с обвязочным кольцом рассматриваются как шарнирные (опорные изгибающие моменты равны нулю). Вертикальная нагрузка включает постоянную нагрузку (g_n), снеговую нагрузку (q_s) и технологический вакуум (p_0) и распределяется вдоль радиальных элементов по закону треугольника. В радиально расположенных элементах возникают вертикальные (V) и горизонтальные (H) составляющие опорной реакции, которые определяются по следующим формулам:

$$V = (g_n + 0,9q_s + 0,95p_0\gamma_{f6})\pi r^2/n; \quad (3.56)$$

$$H = Vr/(3h). \quad (3.57)$$

После этого радиальные балки рассчитываются как внецентренно сжатые элементы, при этом расчетная длина балок принимается равной их конструктивной длине ($l_{ef} = r/\cos\varphi_0$). Устойчивость радиальных балок проверяется только в вертикальной плоскости, т. к. устойчивость в горизонтальной плоскости обеспечивается стальным настилом. Фермы рассчитываются как обычные стержневые конструкции на действие вертикальной нагрузки и горизонтальной составляющей опорной реакции (H). При этом пролет ферм принимается равным диаметру резервуара ($2r$).

Настил и прогоны, расположенные между радиальными балками рассчитываются также, как и для конусного покрытия с центральной стойкой (п. 3.5.2). Кроме радиальных балок (ферм), прогонов и настила рассчитывается еще обвязочное кольцо. Обвязочное кольцо рассчитывается на действие растягивающей силы

$$N_{об} = \frac{Hn}{2\pi} \quad (3.58)$$

где n – количество радиальных балок.

Учитывая наличие листовой оболочки, влиянием усилий создаваемых ветровой нагрузкой можно пренебречь.

Центральное кольцо проверяется на устойчивость

$$N_{об} \leq N_{cr} = \frac{3EI}{r_k^2} \quad (3.59)$$

где r_k – радиус центрального кольца.

3.5.4. Расчет сферических покрытий (см. рис. 2.13)

Настил сферического покрытия рассчитывается по формулам (3.49)–(3.55), где пролет настила (l_n) принимается равным расстоянию между кольцевыми прогонами. В свою очередь, кольцевые прогоны рассчитываются по балочной схеме. Опорами кольцевых прогонов являются радиально расположенные полуарки. Расчет радиальных элементов (полуарок) можно свести к расчету однопролетных арок на двух неподвижных шарнирных опорах с пролетом равным диаметру резервуара. При этом предполагается, что сопряжение полуарок с центральным кольцом является жестким. Арки могут рассматриваться как арки с условными затяжками, если кольцевые прогоны образуют замкнутые кольца, работающие на изгиб и растяжение. Площадь сечения условной затяжки определяется из равенства увеличения диаметра кольца удлинению условной затяжки:

$$A_3 = \frac{4r_1 A \sin^2 \varphi / 2}{l_n}, \quad (3.60)$$

где A – сечение кольцевого прогона;

φ – угол между проекциями радиальных полуарок на горизонтальную плоскость;

l_n – пролет кольцевого прогона;

r_1 – радиус кольца, образованного кольцевыми прогонами.

После такой замены радиальные арки рассматриваются как плоские арки с затяжками. Определение усилий в таких арках производится с использованием программных комплексов или методами строительной механики, например, методом сил. В последнем случае в качестве неизвестных принимаются усилия в условных затяжках. Проверка прочности кольцевых прогонов в этом случае производится с учетом двух усилий

$$\frac{M}{W} + \frac{N}{A} \leq R_y \gamma_c, \quad (3.61)$$

где M – изгибающий момент вычисленный как для однопролетной балки;

N – усилие в кольце, образованном кольцевыми прогонами:

$$N = H_3 n / 2\pi, \quad (3.62)$$

где H_3 – растягивающее усилие в условной затяжке на уровне, соответствующих кольцевых прогонах;

n – количество радиальных полуарок.

В запас прочности можно пренебречь растягивающими усилиями в кольцевых прогонах и рассматривать арки без учета условных затяжек. При такой расчетной схеме арка становится один раз статически неопределимой. Усилия определяются с использованием программных комплексов или с помощью таблиц [8]. В последнем варианте по таблицам определяется распор (H), а другие усилия определяются по ниже приведенным формулам:

$$M = M_b - Hy; \quad Q = Q_b \cos \alpha - H \sin \alpha; \quad (3.63)$$

$$N = Q_b \cdot \sin \alpha + H \cdot \cos \alpha, \quad (3.64)$$

где M_v , Q_v – изгибающий момент и поперечная сила, определяемые как в однопролетной шарнирно опертой балке;

α – угол между горизонталью и касательной в точке определения усилия;

y – вертикальная ордината точки, в которой определяется усилие.

Вертикальные опорные реакции (V) определяются как в однопролетной балке. Проверка прочности арок осуществляется по формуле

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq R_y \gamma_s / \gamma_n. \quad (3.65)$$

Устойчивость арок в горизонтальной плоскости обеспечивается кольцевыми прогонами и настилом. Устойчивость в вертикальной плоскости может быть проверена по следующим формулам.

Для двухшарнирных круговых арок

$$\sigma \leq \sigma_{cr} = k \frac{EI_x}{r_c^2 A}, \quad (3.66)$$

где I_x – момент инерции сечения арки относительно горизонтальной оси;

k – коэффициент, принимаемый по табл. 3.8 в зависимости от угла « β », который определяется из следующего уравнения:

$$\operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} = \frac{2(r_c - f)}{D}. \quad (3.67)$$

Таблица 3.8

Значения коэффициента « k »

β°	90	120	150	180
k	15,0	8,0	4,76	3,0

Для двухшарнирных параболических арок

$$\sigma \leq \sigma_{cr} = k \frac{EI_x}{8lfA}, \quad (3.68)$$

где l, f – пролет и стрела подъема арки;

k – коэффициент, определяемый по табл. 3.9 в зависимости от отношения стрелы подъема арки и пролета арки.

Таблица 3.9

Значения коэффициента « k »

f/l	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
k	28,5	45,4	46,5	43,9	38,4	30,5

Формулы (3.66) и (3.68) действительны только при равномерно распределенной вертикальной нагрузке.

Опорное кольцо рассчитывается на растягивающее усилие:

$$N_p = Hn/2\pi, \quad (3.69)$$

где n – количество полуарок.

Вертикальная опорная реакция (V) воспринимается корпусом (стенкой) резервуара. Соединение обвязочного кольца и стенки корпуса резервуара рассчитывается на совокупность вертикальных реакций. Соединение радиальных полуарок и обвязочного кольца выполняется на сварке или на болтах и рассчитывается на равнодействующее усилие, определяемое геометрическим способом

$$P = \sqrt{H^2 + V^2}. \quad (3.70)$$

Центральное кольцо рассчитывается на устойчивость:

$$\frac{Hn}{2\pi} \leq N_{cr} = \frac{3EI_x}{r_0^2}, \quad (3.71)$$

где r_0 – радиус оси центрального кольца.

Присоединение радиальных полуарок к центральному кольцу может быть болтовым или сварным. Расчет этого соединения выполняется на распорное усилие (H) и изгибающий момент в верхней точке арки.

4. Особенности проектирования резервуаров для хранения жидких органических удобрений

Как было сказано ранее, особенностью таких резервуаров является антикоррозионная защита стальных элементов с помощью эмалей и связанная с этим невозможность использовать соединения на сварке. Эмалевое антикоррозионное покрытие обладает специфическими механическими и физическими характеристиками. Прежде всего, это относится к резкой механической анизотропии: прочность эмали при растяжении примерно в 10 раз меньше прочности при сжатии: (прочность при растяжении составляет 50–100 МПа, при сжатии 500–1000 МПа). Исходя из этого, следует стремиться к преобладанию сжимающих напряжений в эмалированных деталях. Эта задача облегчается тем, что при нанесении эмалевых покрытий на поверхность стальных деталей (в процессе нагрева и остывания) в эмалевом слое уже возникают сжимающие напряжения порядка 100–160 МПа. Это является следствием того, что коэффициенты линейного расширения эмали и стали существенно различаются: $(0,7–0,9) \cdot 10^{-5}$ 1/градус для эмалей и $1,2 \cdot 10^{-5}$ 1/градус для стали.

Разрушение эмалей при растяжении происходит при относительных деформациях, равных (0,12–0,3) %. Приведенные значения относительных деформаций необходимо учитывать при проектировании металлических деталей, которые в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействию растягивающих усилий, т. е. не всегда для этих деталей целесообразно применять стали повышенной или высокой прочности. При сжатии эта проблема, как правило, проявляется в меньшей степени, так как предельные относительные деформации составляют 0,4–1,5 %. При проектировании стальных конструкций с эмалевыми покрытиями необходимо также учитывать некоторые конструктивные требования:

- радиус закруглений не должен быть меньше 7 мм;
- диаметр отверстий перед эмалированием должен быть на 2–3 мм больше диаметра болта;

- перед эмалированием следует избегать соединений, могущих образовывать щели, например, нахлесточных соединений;
- после нанесения эмали на стальную деталь сварка не допускается;
- соединение эмалированных деталей осуществляется только на болтах;
- в процессе эксплуатации следует предохранять стальные конструкции с эмалевым покрытием от ударов.

В данном пособии рассматриваются вопросы конструирования и расчета применительно к наземным резервуарам объемом до 10 000 м³ и при внутреннем давлении не более 1кПа. Эксплуатация резервуаров предполагается в районах с сейсмичностью до 6 баллов. Проектируемые резервуары относятся к 3-му классу по степени опасности (коэффициент надежности по ответственности $\gamma_n = 1.0$).

4.1. Дополнительные материалы для изготовления резервуаров

Стали, рекомендуемые для изготовления конструктивных элементов резервуаров, предназначенных для хранения жидких органических удобрений, такие же, что и для резервуаров для хранения нефтепродуктов (см. выше).

Болты, шайбы, гайки, используемые для сборки конструкций, могут быть выполнены из малоуглеродистых и низколегированных сталей. Класс прочности болтов 4.6; 4.8; 5.6; 5.8. Класс прочности гаек 4.

Высокопрочные болты изготавливаются из термически упрочняемой стали 40Х «Селект». Гайки для высокопрочных болтов должны быть класса прочности 8. Класс точности болтов «В» или «С». Болтовые соединения выполняются с применением круглых шайб. Под головку болта, которая должна быть с внутренней стороны резервуары, ставятся две шайбы: стальная и защитная, например, клингеритовая. В соединениях вне внутреннего объема резервуара уплотнительная и защитная шайбы не ставятся.

Болты, головки которых должны располагаться с внутренней стороны резервуара, поставляются с полукруглой головкой. Длина болта определяется из условия: болт должен выступать за пределы гайки не меньше, чем на 3 мм. Длина нарезанной части болта определяется из условия: нарезка может входить в пакет соединяемых элементов не больше, чем на 5 мм и не больше, чем на половину толщины крайне-

го элемента со стороны гайки. Болты и стальные шайбы поставляются с противокоррозийным покрытием.

При монтаже резервуаров для герметизации стыков используются полимерные материалы.

4.2. Особенности конструктивного решения днищ резервуаров

Днище резервуаров может быть бетонным в виде опорной плиты или из стальных листов, уложенных на опорную плиту. Опорная плита изготавливается из бетона класса прочности С20/25. Диаметр опорной плиты должен быть на 1 м больше диаметра резервуара. Толщина опорной плиты принимается в пределах 15–20 см.

Опорная плита укладывается на основание, включающее насыпной грунт и песчаную подушку. Толщина насыпного грунта составляет 20–30 см. Насыпной грунт должен быть утрамбованным. Супесчаная подушка имеет толщину в пределах 15–20 см.

Узел сопряжения стенки резервуара с опорной плитой показан на рис. 4.1.

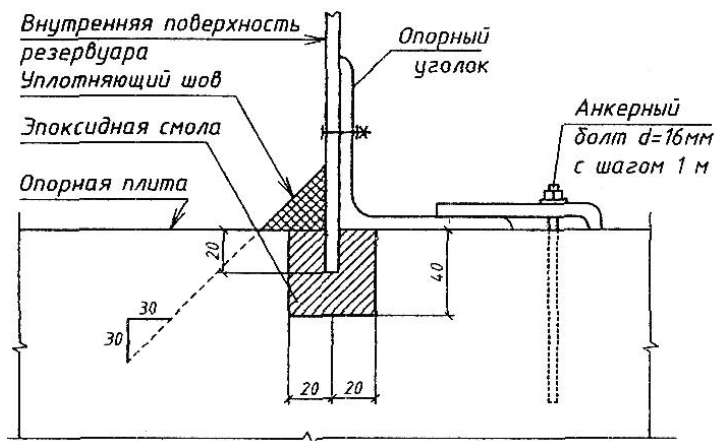


Рис. 4.1. Узел сопряжения стенки резервуара с опорной плитой

Кольцевой паз вырезается в уже готовой опорной плите или предусматривается в процессе изготовления опорной плиты. Анкерные болты устанавливаются в отверстия, которые сверлятся в опор-

ной плите после затвердения бетона. После установки и закрепления первого пояса резервуара паз заливается твердеющим полимерным составом. Уплотняющий шов также выполняется полимерным составом (например, твердеющая уплотнительная масса фирмы «*GLS Tanks*») и наносится после затвердения покрывного слоя на поверхности опорной плиты (см. рис. 4.1).

Опорная плита покрывается либо полимерными материалами, либо стальными эмалированными листами. При первом варианте (без стальных листов) поверхность опорной плиты покрывается грунтовкой, например, полимерным составом «*Primer3*». Затем наносится полимерный состав на основе эпоксидной смолы, например, «*Sika Gard 64N*» с разбавителем (10 %), в который втапливаются полосы из стекловолкна. Покрывной слой также выполняется из эпоксидной смолы, но уже без разбавителя. После затвердения покрывного слоя в месте сопряжения стенки резервуара с дном наносится уплотняющий шов (см. рис. 4.1)

При втором варианте поверхность опорной плиты также покрывается грунтовкой, а нижняя поверхность стальных листов грунтуется и покрывается слоем эпоксидной смолы толщиной 3 мм. При использовании листов эмалированных с двух сторон нижняя поверхность не грунтуется. Стальные листы укладываются на поверхность опорной плиты с зазором между краями листов 10 мм. В зазорах с шагом 1 м сверлятся гнезда глубиной 100 мм и диаметром 10 мм для установки штифтов. Зазоры между листами заделываются покрывным слоем (рис. 4.2). Также, как и в первом варианте, в месте сопряжения стенки резервуара с дном наносится уплотняющий шов.

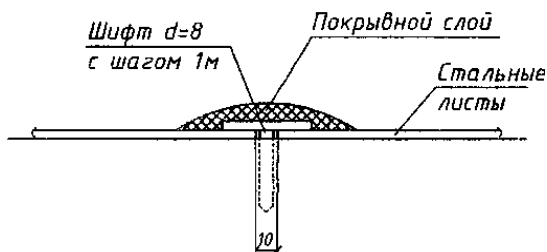


Рис. 4.2. Крепление листов дна к опорной плите

4.3. Особенности проектирования стенки резервуара

4.3.1. Конструктивные решения стенки резервуара

Стенки резервуаров собираются из отдельных свальцованных листов, покрытых эмалью с обеих сторон. Типы листов приведены на рис. 4.3 и 4.4.

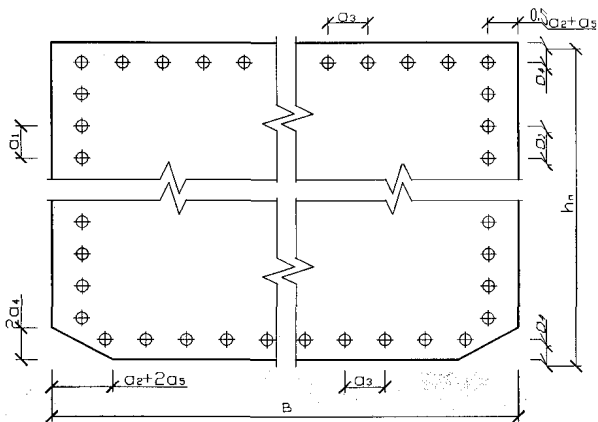


Рис. 4.3. Лист верхнего пояса резервуара

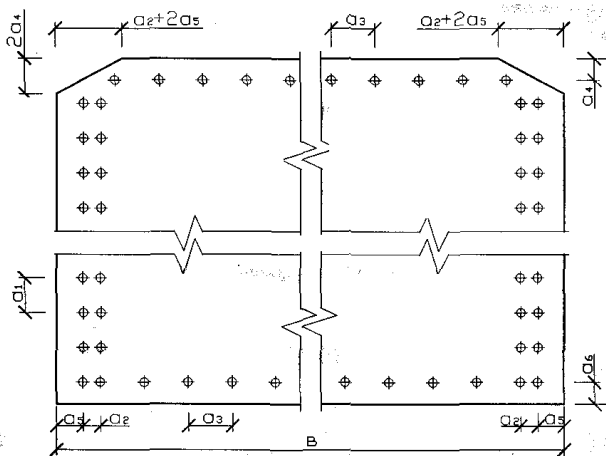


Рис. 4.4. Листы стенки резервуара: лист нижнего пояса

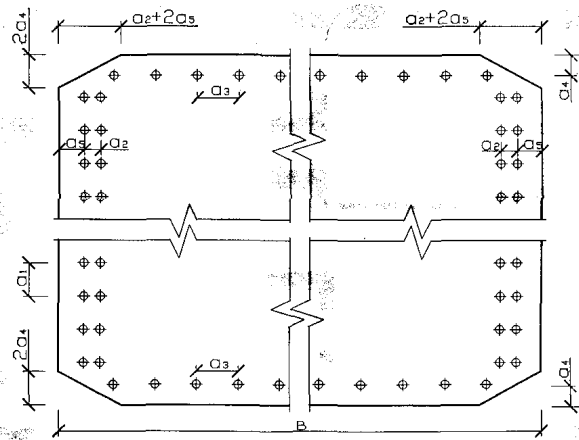


Рис. 4.4. Листы стенки резервуара: лист среднего пояса

Размеры листов (b , h_n) определяются возможностями технологического и транспортного оборудования. Размеры листов должны быть привязаны к размерам листового проката, поставляемого металлургической промышленностью. Соединение листов между собой предусматривается на болтах (рис. 4.5).

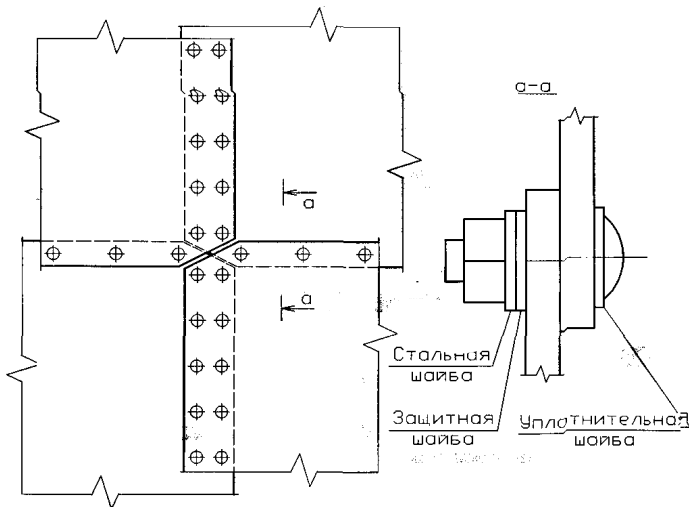


Рис. 4.5. Узел сопряжения листов стенки резервуара

Количество болтов определяется расчетом. Расстояние между болтами (a_1 ; a_2 ; a_3) назначается исходя из требуемого количества болтов, а также с учетом конструктивных требований. Расстояния от центра болта до края листа назначаются в зависимости от диаметра отверстия: $a_1 = a_2 = a_3 \geq 2,5d_{\text{отв}}$; $a_4 = a_5 \geq 2d_{\text{отв}}$; $a_6 \geq 2d_{\text{отв}}$.

Момент затяжки болтов должен составлять 70 или 80 Н/м. После затяжки болтов нахлесточные соединения листов стенки дополнительно герметизируются с помощью твердеющего уплотнительного материала.

Расчет болтовых соединений (при обычных или высокопрочных болтах) осуществляется по соответствующим нормативным документам.

4.4. Особенности проектирования покрытий резервуаров

4.4.1. Шатровые покрытия

Схема шатрового покрытия приведена на рис. 2.8. На рис. 4.6 показан фрагмент шатрового покрытия и узел примыкания оболочки покрытия к обвязочному кольцу.

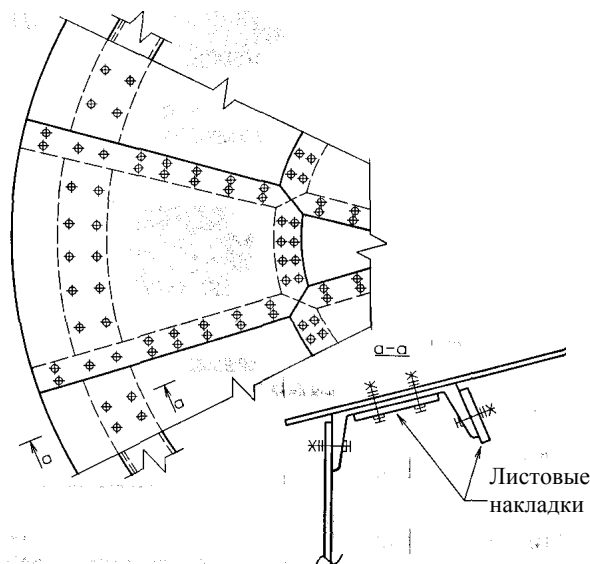


Рис. 4.6. Фрагмент покрытия

Листовые накладки (сечение *a-a*) используются для оформления стыков обвязочного кольца, которое поставляется на монтажную площадку в виде отдельных отправочных марок. Узел сопряжения оболочки покрытия с центральной стойкой и узел опирания центральной стойки на фундамент приведены соответственно на рис. 4.7 и 4.8.

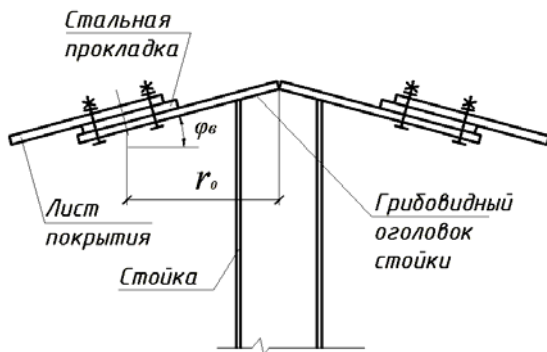


Рис. 4.7. Узел сопряжения оболочки покрытия с центральной стойкой

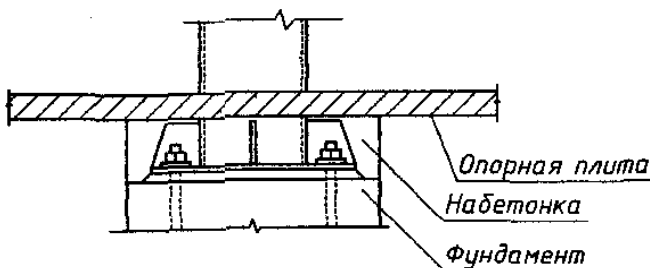


Рис. 4.8. Узел опирания центральной стойки на фундамент

Методика расчета шатровых покрытий приведена в п. 3.5.1.

4.4.2. Конические покрытия

Конструктивные решения конических покрытий с центральной стойкой и без центральной стойки приведены соответственно на рис.

2.10 и 2.12. Узлы сопряжения радиальных балок с опорным (обвязочным) кольцом и с центральной стойкой приведены на рис. 4.9.

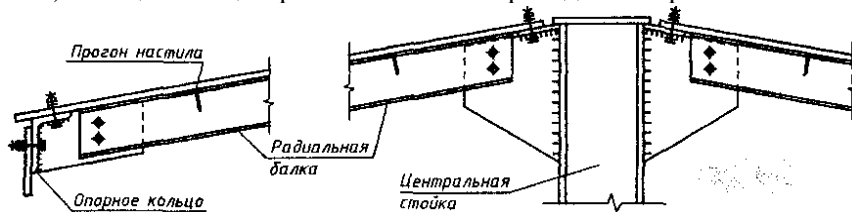


Рис. 4.9. Узлы сопряжения радиальных балок покрытия с опорным кольцом и центральной стойкой

В конических покрытиях без центральной стойки в качестве радиальных элементов используются балки. Узловые соединения радиальных балок с обвязочным кольцом и с центральным кольцом выполняются по аналогии с сферическими покрытиями (см. рис. 2.15 и 2.16). Расчет конических покрытий приведен в п 3.5.2 и 3.5.3.)

Литература

1. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов : ПБ03-605–03.
2. Нагрузки и воздействия: СНИП 2.01.07.-85.
3. Стальные конструкции. Нормы проектирования: СНИП II -23-81*.
4. Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов. Правила проектирования и устройства: ТКП 45-5.04-172-2010.
5. Стальные строительные конструкции. Правила изготовления: ТКП 45- 5.04-121-2009
6. Стальные конструкции. Правила монтажа: ТКП 45 – 5.04 – 41-2006
7. Металлические конструкции: справочник проектировщика. – М. : Стройиздат, 1980.
8. Справочник проектировщика. в 3 т. – М.: Стройиздат, 1972 – Т.1: Расчетно-теоретический: – Стройиздат, М. 1972
9. Руководство по монтажу: утв. Фирмой GLS TANKS. – Австрия, 2008 –36 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Оборудование для эксплуатации резервуаров

Резервуары оборудуются следующими видами технологического оборудования:

1. Дыхательная аппаратура для обеспечения проектных значений внутреннего избыточного давления, а также отрицательного давления (вакуума);
2. Приборы для контроля уровня хранимого вещества;
3. Устройства молниезащиты резервуаров.

Указанное оборудование для эксплуатации резервуаров разрабатывается специализированной проектной организацией.

Для обслуживания резервуаров, а также для размещения технологического оборудования, в покрытии устраивают патрубки и люки (см.[1]). Геометрические параметры технологических проемов определяются заказчиком. Количество технологических проемов также назначается заказчиком и вносится в техническое задание.

Испытания резервуаров

Резервуары с покрытием испытываются на гидравлическое давление, избыточное давление и отрицательное давление (вакуум). Резервуары без покрытий испытываются только на гидравлическое давление.

Гидравлическое испытание осуществляется наливом воды до верхней отметки хранимого вещества, предусмотренной проектом. Гидравлическое испытание следует проводить при температуре окружающего воздуха не ниже +5 °С. В процессе гидравлического испытания все люки и патрубки в покрытии должны быть открыты. Налив воды следует осуществлять поэтапно – на высоту каждого пояса стенки резервуара. После очередного налива воды следует выдержать паузу в течение 10 мин и затем осмотреть все стыки с целью обнаружения течи.

При обнаружении течи необходимо прекратить испытание, слить воду на один пояс ниже обнаруженного дефекта, установить и устранить причину течи. После этого продолжить испытание.

Резервуар, залитый водой до проектной отметки, выдерживается под этой нагрузкой не менее 24 ч. Если в течение указанного периода времени не были обнаружены течи и не понизился уровень воды, то считается, что резервуар выдержал гидравлическое испытание. Результаты гидравлического испытания оформляются актом.

Испытание на избыточное и отрицательное давление производят во время гидравлического испытания. Значение избыточного испытательного давления должно быть на 25 % больше проектного, а значение отрицательного – на 50 % больше проектного.

Продолжительность выдерживания резервуара под избыточным или отрицательным давлением – 30 мин. Если в течение указанного времени не были отмечены уменьшения значений испытательных давлений, то резервуар считается выдержавшим испытание. Результаты испытаний также оформляются актом.

Испытания резервуаров должны производиться в соответствии с технологической картой испытаний, являющейся составной частью проекта производства работ.

После завершения испытаний, а также после завершения работ по антикоррозийной защите и теплозащите (при необходимости) и установки технологического оборудования составляется паспорт и резервуар вводится в эксплуатацию.

Пример расчета № 1

Расчет резервуара для хранения органических удобрений

Исходные данные:

1. Район строительства – Минская область;
2. Геометрические параметры – диаметр 25.2 м, высота 10 м;
3. Плотность хранимого продукта – 10 кН/м^3 ;
4. Покрытие (крыша) каркасное коническое без центральной стойки;
5. Положительное давление в газовом пространстве резервуара отсутствует ($P_n = 0$) P_n ;
6. Тип днища – бетонное;
7. Припуск на коррозию – 2 мм;
8. Расчетный срок службы резервуара – 20 лет;
9. Резервуар относится к первому классу ответственности ($\gamma_n = 1,1$).

Опорная плита изготавливается из бетона класса прочности С20/25. Диаметр опорной плиты принят равным 26,2 м, а толщина 20 см. Опорная плита укладывается на основание, включающее насыпной грунт и песчаную подушку (см. рис. 2.4). Толщина насыпного грунта составляет 30 см, а супесчаная подушка имеет толщину 20 см.

Узел сопряжения стенки резервуара с опорной плитой показан на рис. 4.1.

1. Сбор нагрузок

При расчете резервуара учитываются следующие нагрузки:

1. давление хранимого вещества (g);
2. атмосферные воздействия: ветер (q_w) и снег (q_s);
3. собственный вес металлоконструкций покрытия ($g_{п}$) и стенки ($g_{ст}$);
4. отрицательное давление внутри корпуса резервуара, которое образуется ветровым потоком (p_v).

Определение давления на пояса стенки резервуара

Внутреннее давление жидкости на пояса стенки резервуара определяется по формуле (3.1). Нумерация поясов снизу вверх.

Давление на 1-й пояс стенки резервуара

$$g = \rho \gamma_{f1} x + p_{и} \gamma_{f2} = 10 \cdot 10^3 \cdot 1,1 \cdot 10 + 0 = 110 \text{ кН/м}^2 ;$$

где ρ – плотность хранимой жидкости ($\rho = 10 \text{ кН/м}^3$);

γ_{f1} – коэффициент надежности по нагрузке ($\gamma_{f1} = 1,1$);

x – расстояние от верхнего уровня хранимой жидкости до нижней точки рассматриваемого пояса резервуара ($x = 10 \text{ м}$);

$p_{и}$ – избыточное давление (кН/м^2), при не герметичном покрытии ($p_{и} = 0$);

γ_{f2} – коэффициент надежности по нагрузке ($\gamma_{f2} = 1,2$).

Давление на 2-й пояс стенки резервуара ($x = 8 \text{ м}$)

$$g = \rho \gamma_{f1} x + p_{и} \gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 8 + 0 = 88 \text{ кН/м}^2 ,$$

Давление на 3-й пояс стенки резервуара ($x = 6$ м)

$$g = \rho\gamma_{f1}x + p_{и}\gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 6 + 0 = 66 \text{ кН/м}^2.$$

Ветровое давление определяется по формуле (3.2). Значение ветрового давления на 1-й, 2-й и 3-й пояса стенки резервуара

$$q_w = w_0\gamma_{f3}kc_{e1} = 0,23 \cdot 1,4 \cdot 0,75 \cdot 1,131 = 0,273 \text{ кН/м}^2,$$

где $w_0 = 0,23 \text{ кН/м}^2$ – нормативное значение ветрового давления для Минской области;

γ_{f3} – коэффициент надежности по нагрузке ($\gamma_{f3} = 1,4$);

$k = 0,75$ на высоте до 5 м;

c_{e1} – аэродинамический коэффициент определяемый по формуле (3.3):

$$c_{e1} = c_{\beta}k_1 = -1,3 \cdot 0,87 = -1,131;$$

$c_{\beta} = -1,3$ – определяется по табл. 3.1 при угле $\beta = 70^\circ$;

$k_1 = 0,87$ – определяется по табл. 3.2 при соотношении:

$$H / D = 10\,000 / 25\,200 = 0,4.$$

Давление жидкости на 4-й пояс стенки резервуара ($x = 4$ м)

$$g = \rho\gamma_{f1}x + p_{и}\gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 4 + 0 = 44 \text{ кН/м}^2.$$

Ветровое давление на 4-й пояс

$$q_w = w_0\gamma_{f3}kc_{e1} = 0,23 \cdot 1,4 \cdot 0,8 \cdot 1,131 = 0,291 \text{ кН/м}^2,$$

где $k = 0,8$ на высоте 6 м.

Давление жидкости на 5-й пояс стенки резервуара ($x = 2$ м)

$$g = \rho\gamma_{f1}x + p_{и}\gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 2 + 0 = 22 \text{ кН/м}^2.$$

Ветровое давление на 5-й пояс

$$q_w = w_0 \gamma_{f3} k_{c_{el}} = 0,23 \cdot 1,4 \cdot 0,9 \cdot 1,131 = 0,328 \text{ кН/м}^2,$$

где $k = 0,9$ на высоте 8 м.

2. Расчет стенки резервуара

Стенка резервуара рассматривается как цилиндрическая оболочка. Предварительно толщина каждого пояса стенки резервуара определяется по наибольшему растягивающему напряжению в кольцевом направлении по формуле (3.6). Для стенки принимается сталь с расчетным сопротивлением $R_y = 240$ МПа при толщине 4–10 мм. Коэффициент условий работы (γ_c) принимается равным 0,7 для нижнего пояса и 0,8 для всех остальных поясов. Полученные значения толщины округляются в большую сторону до значений листового проката. Рекомендуется принимать толщину стенки резервуара не менее 4 мм

1-й пояс

$$t \geq \frac{(g + q_w) r \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{(110 \cdot 10^3 + 0,273 \cdot 10^3) \cdot 12,6 \cdot 1,1}{240 \cdot 10^6 \cdot 0,7} = 0,0085 \text{ м.}$$

Принимаем $t = 9$ мм.

2-й пояс

$$t \geq \frac{(g + q_w) r \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{(88 \cdot 10^3 + 0,273 \cdot 10^3) \cdot 12,6 \cdot 1,1}{240 \cdot 10^6 \cdot 0,8} = 0,0068 \text{ м.}$$

Принимаем $t = 7$ мм ;

3-й пояс

$$t \geq \frac{(g + q_w) r \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{(66 \cdot 10^3 + 0,273 \cdot 10^3) \cdot 12,6 \cdot 1,1}{240 \cdot 10^6 \cdot 0,8} = 0,0051 \text{ м.}$$

Принимаем $t = 6$ мм .

Аналогичным образом определяется толщина 4-го и 5-го поясов, для которых принимается $t = 4$ мм .

После назначения толщины следует проверить прочность стенки по наибольшим меридиональным напряжениям в каждом поясе по формуле (3.7) и прочность по приведенным напряжениям от совместных нагрузок также в каждом поясе стенки резервуара по формуле (3.8).

1-й пояс

$$\begin{aligned}\sigma_M &= \frac{(g_{II} + 0,95P_B)r}{2t} + \frac{0,9P_s}{2\pi r t} + \frac{g_{CT}}{t} = \\ &= \frac{(0,35 \cdot 10^3 + 0,95 \cdot 0,177 \cdot 10^3) \cdot 12,6}{2 \cdot 0,009} + \frac{0,9 \cdot 957 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 12,6 \cdot 0,009} + \frac{4,71 \cdot 10^3}{0,009} = \\ &= 2,10 \text{ МПа} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n = 240 \cdot 0,7 / 1,1 = 153 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

Проверка по приведенным напряжениям

$$\begin{aligned}\sqrt{\sigma_K^2 - \sigma_K \sigma_M + \sigma_M^2} &= \sqrt{146,3^2 + 146,3 \cdot 1,86 + 1,86^2} = \\ &= 147,24 < 1,15 R_y \gamma_c / \gamma_n = 1,15 \cdot 240 \cdot 0,7 / 1,1 = 176 \text{ МПа},\end{aligned}$$

где кольцевые напряжения (растягивающие) определяются по формуле (3.9), а меридиональные напряжения (сжимающие) по формуле (3.10):

$$\begin{aligned}\sigma_K &= \frac{(0,95g + 0,9q_w)r}{t} = \frac{(0,95 \cdot 110 \cdot 10^3 + 0,9 \cdot 0,273 \cdot 10^3) \cdot 12,6}{0,009} = \\ &= 146,6 \cdot 10^6 \text{ Па} = 146,6 \text{ МПа};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_M &= \frac{(g_{II} - 0,95P_B)r}{2t} + \frac{0,9P_s}{2\pi r t} + \frac{g_{CT}}{t} = \frac{(0,35 \cdot 10^3 - 0,95 \cdot 0) \cdot 12,6}{2 \cdot 0,009} + \\ &+ \frac{0,9 \cdot 957 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 12,6 \cdot 0,009} + \frac{4,94 \cdot 10^3}{0,009} = 1,86 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,86 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

Напряжения σ_m , σ_k определяются для нижней точки каждого пояса стенки резервуара. При определении кольцевых и меридиональных напряжений использованы следующие коэффициенты расчетных сочетаний нагрузок: 0,95 – для временных длительных нагрузок и 0,9 – для кратковременных нагрузок. В формулах приняты следующие значения используемых величин:

g_n – расчетная нагрузка от собственной массы покрытия резервуара предварительно принята равной 0,35 кН/м² (нормативная $g_{np} = 0,33 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$)

P_s – суммарная снеговая нагрузка на покрытие. Суммарная нагрузка определяется с учетом распределения снеговой нагрузки по покрытию

$$P_s = q_s \pi r^2 = 1,92 \cdot 10^3 \cdot 3,14 \cdot (12,6)^2 = 957 \text{ кН},$$

где q_s – расчетное значение снеговой нагрузки на 1 м² определяется по формуле (3.5):

$$q_s = S_0 \gamma_{f5} \mu = 1,2 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 1 = 1,92 \text{ кН/м}^2,$$

где $S_0 = 1,2 \text{ кН/м}^2$ – нормативное значение веса снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли, принимаемое для Минской области;

γ_{f5} – коэффициент надежности по снеговой нагрузке равен 1,6;

μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, для конического покрытия при $\alpha = 8^\circ$, $\mu = 1$.

p_b – отрицательное ветровое давление на стенку резервуара (ветровой вакуум-разряжение) определяется по формуле (3.4):

$$p_b = w_0 \gamma_{f4} k c_i = 0,23 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot (-0,64) = -0,177 \text{ кН/м}^2,$$

где γ_{f4} – коэффициент надежности по нагрузке ($\gamma_{f4} = 1,2$);

k – определяется на высоте равной высоте резервуара, $k = 1$;

c_i – аэродинамический коэффициент, определяемый по табл. 3.3 в зависимости от соотношения высоты резервуара к его диаметру, $c_i = -0,64$ – при соотношении $H / D = 10\,000 / 25\,200 = 0,4$;

$g_{ст}$ – расчетная нагрузка от вышележащей части стенки резервуара на единицу длины окружности резервуара (кН/м):

$$g_{ст} = \gamma \gamma_{f6} \sum t_i h_n = 78,5 \cdot 10^3 \cdot 1,05 \cdot (0,009 + 0,007 + 0,006 + 0,004 + 0,004) \cdot 2 = 4,71 \text{ кН/м}^2,$$

где $\gamma = 78,5 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$ – плотность металла;

γ_{f5} – коэффициент надежности по нагрузке (для нагрузки, создаваемой собственным весом металлических конструкций, $\gamma_{f5} = 1,05$);

$\sum t_i$ – сумма толщин поясов, расположенных выше рассматриваемой точки;

h_n – ширина пояса стенки резервуара.

Аналогичным способом осуществляется проверка прочности по меридиональным и приведенным напряжениям для других поясов стенки резервуара. Результаты проверок всех поясов приведены в табл. П.1.

Таблица П.1

Результаты проверочных расчетов

№ пояса	t , мм	$g_{ст}$, кН/м	g , кН/м ²	q_w , кН/м ²	σ_w , МПа	Привед. напряж.	$R_y \gamma_c$
1	9	4,710	110	0,273	2,10	147,24	179,30
2	7	3,297	88	0,273	2,49	150,50	179,30
3	6	2,198	66	0,273	2,72	131,7	179,30
4	4	1,256	44	0,291	3,85	131,6	179,30
5	4	0,016	22	0,328	3,54	66,0	179,30

Из результатов проверочных расчетов следует, что прочность всех поясов стенки резервуара является обеспеченной.

Болтовое соединение листов одного пояса между собой рассчитывается на усилие, определяется на ширину в 1 м:

$$N = \sigma_k t,$$

где σ_k – кольцевое напряжение, определяемое по формуле (3.9);
 t – толщина листов соответствующего пояса стенки.

Примем диаметр болтов $d = 16$ мм ($A = 2,01$ см²), класс прочности 5,8 ($R_{bs} = 20$ кН/см²), класс точности болтов «В» ($\gamma_b = 0,9$).

Болтовое соединение листов 1-го пояса между собой рассчитывается на усилие

$$N = \sigma_k t = 146,6 \cdot 10^3 \cdot 0,009 = 1316,7 \text{ кН.}$$

Количество болтов на 1 м вертикальной ширины 1-го пояса стенки

$$n = N / N_{b \min} = 1316,7 / 36,18 = 36,4 \text{ шт./м,}$$

где $N_{b \min}$ – меньшее из двух несущих способностей, которые определяются по СНИП II-23–81*[3]:

$$N_b = R_{bs} \gamma_b A n_s = 20 \cdot 0,9 \cdot 2,01 \cdot 1 = 36,18 \text{ кН};$$

$$N_b = R_{bp} \gamma_b d \sum t = 47,25 \cdot 0,9 \cdot 1,6 \cdot 0,9 = 61,24 \text{ кН},$$

где R_{bs} , R_{bp} – расчетное сопротивление на срез и смятие соответственно;

γ_b – коэффициент условий работы болтовых соединений, который для болтов класса точности В равен 0,9;

A – площадь сечения болта;

n_s – число плоскостей среза одного болта;

d – диаметр болта;

$\sum t$ – наименьшая суммарная толщина элементов, сминаемых в одном направлении.

Болтовое соединение поясов стенки между собой рассчитывается на усилие

$$N = \sigma_M t = 2,1 \cdot 10^3 \cdot 0,009 = 18,9 \text{ кН.}$$

Количество болтов на 1 м горизонтальной длины поясов стенки

$$N = N/N_{B \min} = 18,9/36,18 = 0,5 \text{ шт./м.}$$

Расчеты болтовых соединений для остальных поясов даны в табл. П.2 и П.3.

Таблица П.2

Количество болтов для соединения листов
в поясе стенки (по вертикали)

№ пояса	t , мм	σ_k , МПа	N , кН/м	$N_{B \min}$, кН	n , шт./м
1	9	146,30	1316,70	36,18	37
2	7	150,66	1054,60	36,18	30
3	6	132,08	792,50	36,18	22
4	6	132,50	529,98	36,18	15
5	6	66,76	267,06	36,18	8

Таблица П.3

Количество болтов для соединения поясов стенки
между собой (по горизонтали)

№ пояса	t_{\min} , мм	σ_M , МПа	N , кН/м	$N_{B \min}$, кН	n , шт./м
1-2	9	2,10	18,9	36,18	0,5
2-3	7	2,49	17,43	36,18	0,48
3-4	6	2,72	16,32	36,18	0,45
4-5	4	3,85	15,4	36,18	0,43

Окончательное количество болтов (по вертикали и по горизонтали) назначается с учетом наибольшего (предельного) расстояния между болтами

$$a_{1\max} = 8d_{\text{отв}} \text{ или } a_{1\max} = 12t_{\min}.$$

Проверка устойчивости стенки резервуара

Потеря устойчивости стенки корпуса резервуара может произойти в результате отдельного или совместного действия сжимающих кольцевых (горизонтальных) и меридиональных (вертикальных) напряжений. Проверка устойчивости производится по формулам (3.14) или по формуле (3.15).

Проверка устойчивости 1-го пояса.

Редуцированная высота определяется по формуле (3.16)

$$H_r = \sum_{i=1}^n h_{\text{ни}} \cdot \left(\frac{t_{\min}}{t_i} \right)^{5/2} = 2 \cdot \left[\left(\frac{4}{9} \right)^{5/2} + \left(\frac{4}{7} \right)^{5/2} + \left(\frac{4}{6} \right)^{5/2} + \left(\frac{4}{4} \right)^{5/2} + \left(\frac{4}{4} \right)^{5/2} \right] = 2,21 \text{ м};$$

Кольцевое напряжение определяется по формуле (3.16)

$$\sigma_{\kappa} = (0,9q_w + 0,95p_B) r / t = (0,9 \cdot 0,23 \cdot 10^3 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot 0,5 + 0,95 \cdot 0,177 \cdot 10^3) \times \\ \times \frac{12,6}{0,009} = 0,438 \text{ МПа},$$

Кольцевое критическое напряжение определяется по формуле (3.17)

$$\sigma_{\text{крк}} = 0,55E \frac{r}{H_r} \left(\frac{t}{r} \right)^{3/2} = 0,55 \cdot 2,06 \cdot 10^5 \cdot \frac{12,6}{2,21} \left(\frac{0,009}{12,6} \right)^{3/2} = 12,15 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\kappa} = 0,438 \text{ МПа} < \sigma_{\text{крк}} \gamma_c = 12,15 \cdot 1,0 = 12,15 \text{ МПа}.$$

Меридиональное напряжение определяется по формуле (3.7):

$$\begin{aligned}\sigma_M &= \frac{(g_{\Pi} + 0,95p_B)r}{2t} + \frac{0,9P_s}{2\pi r t} + \frac{g_{ср}}{t} = \\ &= \frac{(0,35 \cdot 10^3 + 0,95 \cdot 0,177 \cdot 10^3)12,6}{2 \cdot 0,009} + \frac{0,9 \cdot 957 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 12,6 \cdot 0,009} + \frac{4,71 \cdot 10^3}{0,009} = \\ &= 2,10 \text{ МПа.}\end{aligned}$$

Меридиональное критическое напряжение определяется по формуле (3.19)

$$\begin{aligned}\sigma_{срМ} &= \frac{cEt}{r} = \frac{0,076 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,009}{12,6} = 11,12 \text{ МПа;} \\ \sigma_M &= 2,1 \text{ МПа} < \sigma_{срМ} \gamma_c = 11,12 \cdot 1,0 = 11,12 \text{ МПа,}\end{aligned}$$

где коэффициент «с» определяется по табл. 3.6.

Проверка устойчивости по формуле (3.15)

$$\frac{\sigma_K}{\sigma_{срК}} + \frac{\sigma_M}{\sigma_{срМ}} = \frac{0,438}{12,15} + \frac{2,1}{11,12} = 0,22 < \gamma_c = 1,0.$$

Устойчивость 1-го пояса обеспечена. Проверка 2, 3, 4 и 5 поясов производится по аналогии. Результаты проверки занесены в табл. П.4.

Таблица П.4

Результаты проверки устойчивости

№ пояса	t, мм	σ_K , МПа	$\sigma_{срК}$, МПа	$\frac{r}{t} \Rightarrow c$		σ_M , МПа	$\sigma_{срМ}$, МПа	$\frac{\sigma_K}{\sigma_{срК}} + \frac{\sigma_M}{\sigma_{срМ}} \leq \gamma_c$
				r	c			
1	9	0,438	12,147	1400	0,076	2,10	11,129	0,224
2	7	0,563	9,448	1800	0,067	2,49	7,631	0,386
3	6	0,657	8,098	2100	0,064	2,72	6,248	0,517
4	4	0,986	5,399	3150	0,052	3,85	3,384	1,321
5	4	0,986	5,399	3150	0,052	3,54	3,384	1,229

По результатам, приведенным в таблице видно, что проверка на устойчивость 4-го и 5-го поясов не выполняется. Так как устойчивость этих поясов не обеспечивается за счет того, что $\sigma_m > \sigma_{срм}$, то следует увеличить толщину этих поясов (повышение устойчивости в меридиональном направлении обеспечивается только за счет увеличения толщины поясов стенки). Принимаем толщину 4-го и 5-го поясов равной 6 мм. После этого следует заново произвести проверку устойчивости этих поясов (в данном примере повторная проверка не приводится). Так как условие устойчивости по кольцевым напряжениям выполняется ($\sigma_k < \sigma_{срк}$), то промежуточные кольца жесткости не нужны.

После выполнения всех проверок толщину поясов стенки резервуара следует увеличить с учетом минусового допуска на прокат ($\Delta = 0,4$ мм) и с учетом коррозионного износа ($c = 2$ мм)

$$t = t + \Delta + c .$$

Указанное увеличение толщины не требуется делать, если выполняется условие (3.13):

$$\frac{R_y \gamma_c}{\sqrt{\sigma_k^2 - \sigma_k \sigma_m + \sigma_m^2}} \geq 1 + \frac{\Delta + c}{t} .$$

Окончательные значения толщины приведены в таблице П.5. Увеличение толщины поясов стенки резервуара требуется для 1-го, 2-го, 3-го поясов, так как условие (3.13) для них не выполняется

Таблица П.5

Толщины поясов с учетом минусовых допусков на прокат и припусков на коррозию

№ пояса	t , мм	Δ , мм	c , мм	$\frac{R_y \gamma_c}{\sqrt{\sigma_k^2 - \sigma_k \sigma_m + \sigma_m^2}}$	$1 + \frac{\Delta + c}{t}$	$t + \Delta + C$, мм
1	2	3	4	5	6	7
1	9	0,4	2	1,18	1,27	12
2	7	0,4	2	1,15	1,34	10

1	2	3	4	5	6	7
3	6	0,4	2	1,31	1,4	9
4	6	0,4	2	2,25	1,4	6
5	6	0,4	2	3,9	1,4	6

2.3. Расчет конического покрытия

Конические покрытия состоят из радиально направленных балок, прогонов настила, направленных тангенциально, стального настила и опорного кольца (см. рис. 2.12). Рекомендуемое превышение $h \approx 0,1r$. С целью индустриализации и сокращения сроков монтажа покрытие предусматривается щитовым. Щиты состоят из радиальных балок, прогонов настила и листов настила. Соединения внутри щита выполняются на сварке. Соединение щитов между собой выполняются с помощью болтов. По периметру резервуара щиты опираются на опорное кольцо, а в центре на центральное кольцо. Узлы сопряжений оформляются на болтах. После окончания монтажа все стыки, выполненные с помощью болтов, могут быть герметизированы с помощью твердеющего уплотнительного материала.

Предварительно предполагается, что расчетная схема настила – это жесткая нить ($EI \neq 0$) на двух неподвижных опорах. Толщина настила определяется из условия жесткости

$$t_n = l_n / \left[\frac{4n_0}{15} \left(1 + \frac{72E_{\text{ц}}}{n_0^4 q_n} \right) \right] = 1 / \left[\frac{4 \cdot 150}{15} \cdot \left(1 + \frac{72 \cdot 2,3 \cdot 10^8}{150^4 \cdot 1,53} \right) \right] = 0,00112 \text{ м},$$

где l_n – пролет настила, равный расстоянию между прогонами ($l_n = 1$ м);

n_0 – предельное отношение пролета к прогибу (назначается равным 150);

q_n – нормативная нагрузка на 1 м^2 , включающая собственный вес покрытия и снега ($q_n = g_{\text{нп}} + S_0 = 0,33 + 1,2 = 1,53 \text{ кН/м}^2$).

$E_{\text{ц}}$ – цилиндрический модуль деформаций: $E_{\text{ц}} = 2,3 \cdot 10^8 \text{ кН/м}^2$.

Принимается толщина настила 3 мм, как наименьшая допустимая толщина. После назначения толщины настила его следует проверить на прочность. Так как отношение l_n/t_n превышает 300, то проверочные расчеты настила выполняются без учета его изгибной жесткости.

Распор определяется по формуле

$$H = \sqrt[3]{\frac{DE_z A}{2l}} = \sqrt{\frac{0,43 \cdot 2,3 \cdot 10^8 \cdot 0,003}{2 \cdot 1}} = 52,9 \text{ кН},$$

где D – характеристика нагрузки:

$$D = \frac{q^2 l^3}{12} = \frac{2,27^2 \cdot 1^3}{12} = 0,43 \text{ кН}^2 \cdot \text{м},$$

где q – расчетная погонная нагрузка: $q = (q_n + q_s) b = (0,35 + 1,92) \cdot 1 = 2,27 \text{ кН/м}$

$$\text{Проверка прочности: } \frac{H}{A} = \frac{52,9}{30} = 1,76 \leq R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 21,8 \text{ кН/м}^2.$$

Прочность обеспечена.

Прогоны настила рассчитываются по балочной схеме. Пролетом прогонов настила является расстояние между радиальными балками (угол между радиальными балками принят равным 15° , тогда наибольший пролет настила равен 3м). Шаг прогонов принят равным 1 м.

Сечение прогона назначается по требуемому моменту сопротивления

$$W = \frac{M \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{258 \cdot 1,1}{24 \cdot 1} = 11,8 \text{ см}^3,$$

где M – наибольший момент в прогоне.

Принимаем уголок 90×6. Его геометрические характеристики: $A = 10,01 \text{ см}^2$, $w = 12,49 \text{ см}^3$.

Радиальные балки рассчитываются как однопролетные шарнирно опертые балки на действие постоянной нагрузки (собственный вес покрытия) (g_n) снеговой нагрузки (q_s). Вдоль пролета радиальной балки нагрузка распределяется по закону треугольника (см. рис. П1). Нагрузка на радиальную балку равна

$$p = (q_s + g_n)b = (1,92 + 0,35) \cdot 3 = 6,81 \text{ кН/м.}$$

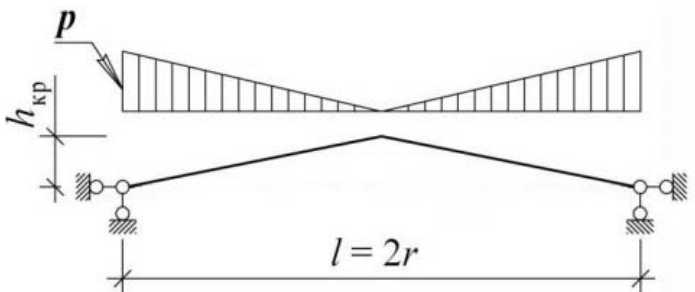


Рис. П1. Расчетная схема радиальной балки

Опорные реакции вертикальные (3.56)

$$V = 43,0 \text{ кН.}$$

Опорные реакции горизонтальные (3.57)

$$H = 164,2 \text{ кН.}$$

Максимальный изгибающий момент (в четверти пролета)

$$M_{\max} = \frac{7}{120} p r^2 = \frac{7}{120} 6,83 \cdot 12,6^2 = 63,3 \text{ кН}\cdot\text{м.}$$

Продольное усилие в радиальной балке

$$N = \frac{Hr}{\sqrt{h_{\text{кр}}^2 + r^2}} = \frac{164,2 \cdot 10^3 \cdot 12,6}{\sqrt{1,1^2 + 12,6^2}} = 163,6 \text{ кН.}$$

Предварительно сечение радиальной балки принимается из I 27 с геометрическими характеристиками: $A = 40,2 \text{ см}^2$; $I_x = 5010 \text{ см}^4$; $W_x = 371 \text{ см}^3$.

Проверка прочности радиальных балок

$$\frac{163,6 \cdot 10^3}{40,2 \cdot 10^{-4}} + \frac{63,3 \cdot 10^3}{371 \cdot 10^{-6}} = 211,3 \text{ МПа} < \frac{R_y \gamma_c}{\gamma_n} = \frac{240 \cdot 1}{1,1} = 218,2 \text{ МПа}.$$

Прочность обеспечена.

Проверка устойчивости радиальных балок из плоскости действия момента не производится, так как сжатый пояс балок закреплен от горизонтальных перемещений с помощью прогонов и настила. Проверка устойчивости радиальных балок в плоскости действия момента выполняется как для обычных внецентренно сжатых элементов на действие усилий M_{\max} и N , при этом за расчетную длину элемента принимается расстояние от опорного (обвязочного) кольца до центрального кольца (в данном примере этот расчет не приводится).

Опорное (обвязочное) кольцо рассчитывается на растягивающее усилие

$$N_p = Hn / 2\pi = 164,2 \cdot 24 / 2 \cdot 3,14 = 627,5 \text{ кН},$$

где $n = 24$ – количество полуарок.

Принимаем швеллер № 30 со следующими геометрическими характеристиками: $A = 40,50 \text{ см}^2$, $I_x = 5810,0 \text{ см}^4$, $W_x = 387,0 \text{ см}^3$.

Проверка прочности кольца

$$\frac{N}{A} = \frac{627,5 \cdot 10^3}{40,50 \cdot 10^{-4}} = 156,1 \text{ МПа} \leq \frac{R_y \gamma_c}{\gamma_n} = \frac{245 \cdot 1}{1,1} = 218 \text{ МПа}.$$

Прочность обеспечена.

Центральное кольцо в данном конструктивном решении отсутствует.

Пример расчета № 2

Расчет резервуара объемом 10 000 м³

Исходные данные:

1. Ветровая нагрузка: $w_0 = 0,23$ кН/м²; снеговая нагрузка: $s_0 = 0,8$ кН/м².
2. Геометрические параметры – диаметр 32,6 м высота 12 м.
3. Плотность хранимого продукта – 10 кН/м³.
4. Покрытие (крыша) – шатровая оболочка.
5. Избыточное давление в газовом пространстве резервуара: $p_{и} = 1$ кН/м².
6. Тип днища – бетонное.
7. Припуск на коррозию – 2 мм.
8. Расчетный срок службы резервуара – 20 лет.
9. Резервуар относится к первому классу ответственности ($\gamma_n = 1,1$).

Конструктивные решения днища и стенки резервуара см. п.4.2 и 4.3. Конструктивные решения шатрового покрытия см. п.4.4.1

Сбор нагрузок

При расчете резервуара учитываются следующие нагрузки:

1. Давление хранимого вещества (g);
2. Атмосферные воздействия: ветер (q_w) и снег (q_s);
3. Собственный вес металлоконструкций покрытия (g_n) и стенки ($g_{ст}$);
4. Избыточное давление в газовом пространстве резервуара ($p_{и}$);

Определение давления на пояс стенки резервуара

Внутреннее давление на пояс стенки резервуара определяется по формуле (3.1). Нумерация поясов снизу вверх.

Внутреннее давление на 1-й пояс стенки резервуара

$$x_1 = 11,6 \text{ м}, \quad g_1 = \rho\gamma_{f1}x + p_{и}\gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 11,6 + 1 \cdot 1,2 = 128,8 \text{ кН/м}^2;$$

на 2-й пояс:

$$x_2 = 10,1\text{м}, g_2 = \rho\gamma_{f1}x + p_{и}\gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 10,1 + 1 \cdot 1,2 = 112,3 \text{ кН/м}^2 ;$$

на 3-й пояс:

$$x_3 = 8,6\text{м}, g_3 = \rho\gamma_{f1}x + p_{и}\gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 8,6 + 1 \cdot 1,2 = 95,8 \text{ кН/м}^2 ;$$

на 4-й пояс:

$$x_4 = 7,1\text{м}, g_4 = \rho\gamma_{f1}x + p_{и}\gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 7,1 + 1 \cdot 1,2 = 79,3 \text{ кН/м}^2 ;$$

на 5-й пояс:

$$x_5 = 5,6\text{м}, g_5 = \rho\gamma_{f1}x + p_{и}\gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 5,6 + 1 \cdot 1,2 = 62,8 \text{ кН/м}^2 ;$$

на 6-й пояс:

$$x_6 = 4,1\text{м}, g_6 = \rho\gamma_{f1}x + p_{и}\gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 4,1 + 1 \cdot 1,2 = 46,3 \text{ кН/м}^2 ;$$

на 7-й пояс:

$$x_7 = 2,6\text{м}, g_7 = \rho\gamma_{f1}x + p_{и}\gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 2,6 + 1 \cdot 1,2 = 29,8 \text{ кН/м}^2 ;$$

на 8-й пояс:

$$x_8 = 1,1\text{м}, g_1 = \rho\gamma_{f1}x + p_{и}\gamma_{f2} = 10 \cdot 1,1 \cdot 1,1 + 1 \cdot 1,2 = 13,3 \text{ кН/м}^2 .$$

Значение ветрового давления определяется по формуле (3.2).

Определим ветровое давление при $\beta = 0^\circ$:

– на высоте 5 м ($k = 0,75$)

$$q_w = w_0\gamma_{f3}kc_{e1} = 0,23 \cdot 1,4 \cdot 0,75 \cdot 1 = 0,242 \text{ кН/м}^2 ,$$

– на высоте 10 м ($k = 1$)

$$q_w = w_0 \gamma_{f3} k c_{e1} = 0,23 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot 1 = 0,322 \text{ кН/м}^2 ,$$

– на высоте 20 м ($k = 1,25$):

$$q_w = w_0 \gamma_{f3} k c_{e1} = 0,23 \cdot 1,4 \cdot 1,25 \cdot 1 = 0,403 \text{ кН/м}^2 .$$

Аэродинамические коэффициенты c_{e1} определены по формуле (3.3) с использованием табл. 3.1 и 3.2. Результаты вычислений ветровой нагрузки при других углах « β » занесены в табл. П.6.

Таблица П.6

Значения ветрового давления

β	0°	30°	60°	70°	90°	120°	150°	180°
c_β	+1	+0,4	-1,2	-1,3	-1,0	-0,4	-0,4	-0,4
k_1	1	1	0,856	0,856	0,856	0,856	0,856	0,856
c_{e1}	+1	+0,4	-1,027	-1,113	-0,856	-0,342	-0,342	-0,342
$q_w(5\text{м})$	0,242	0,097	-0,248	-0,269	-0,207	-0,083	-0,083	-0,083
$q_w(10\text{м})$	0,322	0,129	-0,331	-0,358	-0,276	-0,110	-0,110	-0,110
$q_w(20\text{м})$	0,403	0,161	-0,413	-0,448	-0,345	-0,138	-0,138	-0,138

Так как покрытие герметично, то отрицательное ветровое давление на внутреннюю поверхность стенки резервуара отсутствует: $p_b = 0$.

Распределение снеговой нагрузки на покрытие приведено на рис. 3.3. Значения снеговой нагрузки на 1 м^2 определяются по формуле (3.5)

$$q_s = S_0 \gamma_{f5} \mu = 0,8 \cdot 1,6 \cdot 1 = 1,28 \text{ кН/м}^2 .$$

Расчет стенки резервуара

Стенка резервуара рассматривается как цилиндрическая оболочка. Предварительно толщина каждого пояса стенки резервуара определяется по наибольшему растягивающему напряжению в кольцевом направлении по формуле (3.6), ветровая нагрузка при этом принимается для угла (β) равного 70° .

Принимаем сталь С245 с расчетным сопротивлением $R_y = 240$ МПа при толщине листов $t = 4\text{--}20$ мм. Коэффициент условий работы (γ_c), принят равным 0,7 для нижнего пояса и 0,8 для всех остальных поясов. Полученные значения толщины округляются в большую сторону до значений листового проката. Рекомендуется принимать толщину стенки резервуара не менее 4 мм.

Предварительное определение толщин для поясов № 1–8:

$$t_1 \geq \frac{(g + q_w) r \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{(128,8 + 0,269) \cdot 16,3 \cdot 1,1}{240 \cdot 0,7} = 13,8 \text{ мм} \approx 14 \text{ мм};$$

$$t_2 \geq \frac{(g + q_w) r \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{(112,3 + 0,269) \cdot 16,3 \cdot 1,1}{240 \cdot 0,8} = 10,5 \text{ мм} \approx 11 \text{ мм};$$

$$t_3 \geq \frac{(g + q_w) r \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{(95,8 + 0,269) \cdot 16,3 \cdot 1,1}{240 \cdot 0,8} = 8,97 \text{ мм} \approx 9 \text{ мм};$$

$$t_4 \geq \frac{(g + q_w) r \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{(79,3 + 0,269) \cdot 16,3 \cdot 1,1}{240 \cdot 0,8} = 7,4 \text{ мм} \approx 8 \text{ мм};$$

$$t_5 \geq \frac{(g + q_w) r \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{(62,8 + 0,2868) \cdot 16,3 \cdot 1,1}{240 \cdot 0,8} = 5,89 \text{ мм} \approx 6 \text{ мм};$$

$$t_6 \geq \frac{(g + q_w) r \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{(46,3 + 0,3135) \cdot 16,3 \cdot 1,1}{240 \cdot 0,8} = 4,35 \text{ мм} \approx 5 \text{ мм};$$

$$t_7 \geq \frac{(g + q_w) r \gamma_n}{R_y \gamma_c} = \frac{(29,8 + 0,3402) \cdot 16,3 \cdot 1,1}{240 \cdot 0,8} = 2,81 \text{ мм} \approx 4 \text{ мм};$$

$$t_8 = 4 \text{ мм.}$$

После назначения толщины следует проверить прочность стенки по наибольшим меридиональным напряжениям по формуле (3.7) в каждом поясе и прочность по приведенным напряжениям от совместных нагрузок по формуле (3.8) также в каждом поясе стенки резервуара. При выполнении проверочных расчетов использованы следующие коэффициенты расчетных сочетаний нагрузок: 0,95 – для временных длительных нагрузок и 0,9 – для кратковременных нагрузок. Рассмотрим проверочный расчет на прочность на примере 1-го пояса.

Расчетная нагрузка от вышележащей части стенки резервуара определяется по формуле (3.11)

$$g_{ст} = \gamma \gamma_{f6} \sum t_i h_n =$$

$$= 78,5 \cdot 1,05 \cdot \sum (4 + 4 + 5 + 6 + 8 + 9 + 11) 10^{-3} \cdot 1,5 = 5,81 \text{ кН/м.}$$

Суммарная снеговая нагрузка на покрытие определяется по формуле

$$P_s = q_s \pi (r^2 - r_1^2) = 1,12 \cdot 3,14 (16,3^2 - 4,075^2) = 876 \text{ кН,}$$

где r_1 радиус зоны без снега (см. рис. 3. 3, з).

Проверка по наибольшим меридиональным напряжениям производится по формуле (3.7)

$$\sigma_m = \frac{(g_{ст} + 0,95 p_B \gamma_{f6}) r}{2t} + \frac{0,9 P_s}{2\pi r t} + \frac{g_{ст}}{t} = \frac{0,45 \cdot 16,3}{2 \cdot 0,014} +$$

$$\frac{0,9 \cdot 876}{2 \cdot 3,14 \cdot 16,3 \cdot 0,014} + \frac{5,81}{0,014} = 1,230 \text{ кН/м}^2 = 1,23 \text{ МПа} < R_y \gamma_c / \gamma_n =$$

$$= 240 \cdot 0,7/1,1 = 152,7 \text{ МПа.}$$

Прочность обеспечена.

Расчетная нагрузка от собственной массы покрытая (g_n) принята равной $0,45 \text{ кН/м}^2$.

Проверка прочности по приведенным напряжениям выполняется по формуле (3.8) при этом учитывается, что кольцевые напряжения растягивающие (знак «+»), а меридиональные сжимающие (знак «-»):

$$\sqrt{\sigma_k^2 - \sigma_k \cdot \sigma_m + \sigma_m^2} = \sqrt{142,7^2 + 142,7 \cdot 0,162 + 0,162^2} =$$

$$142,98 \leq 1,15 R_y \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 1,15 \cdot 240 \cdot \frac{0,7}{1,1} = 175,6 \text{ МПа,}$$

где

$$\sigma_k = \frac{(0,95 \cdot g + 0,9 \cdot q_w) r}{t} = \frac{(0,95 \cdot 128,8 + 0,9 \cdot 0,269) \cdot 16,3}{14} =$$

$$= 142700 \text{ кН/м}^2 = 142,7 \text{ Н/мм}^2 \leq R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} =$$

$$= 240 \cdot 0,7/1,1 = 152,7 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_m = \frac{(q_n - 0,95 p_n \gamma_{f2}) r}{2t} + \frac{0,9 \cdot P_s}{2\pi r t} + \frac{g_{cm}}{t} =$$

$$= \frac{(0,45 - 0,95 \cdot 1 \cdot 1,2) \cdot 16,3}{2 \cdot 0,014} + \frac{0,9 \cdot 876}{2 \cdot 3,14 \cdot 16,3 \cdot 0,014} +$$

$$+ \frac{5,81}{0,014} = 162 \text{ кН/м}^2 = 0,162 \text{ МПа} < R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} =$$

$$= 240 \cdot 0,7/1,1 = 152,7 \text{ МПа.}$$

Прочность обеспечена.

Аналогично выполняется расчет для остальных поясов стенки.

Результаты проверки на прочность сведены в табл. П.7.

Таблица П.7

Результаты проверки на прочность

№ пояса	Толщина для С255, мм	Нагрузки			Напряжения			
		от вышележащей части стенки, кН/м	от жидкости, кН/м ²	ветровая, кН/м ²	наибольшее меридианальное,	кольцевые,	меридианальное,	приведенные,
1	14	5,81	129	0,27	1,23	142,7	0,162	142,9
2	11	4,45	112	0,27	1,44	158,4	0,152	158,6
3	9	3,34	95,8	0,27	1,63	165,3	0,12	165,5
4	8	2,35	79,3	0,27	1,72	154	0,05	154,5
5	6	1,61	62,8	0,29	2,16	162,8	0,03	163
6	5	0,99	46,3	0,31	2,47	144,3	0,02	144,5
7	4	0,33	29,8	0,34	2,92	116,6	0,013	116,8
8	4	0	13,3	0,36	2,84	52,8	0,012	53,2

Из анализа приведенных результатов следует: прочность всех поясов стенки резервуара является обеспеченной.

Увеличение толщины поясов стенки резервуара с учетом минусового допуска на прокат ($\Delta = 0,4$ мм) и с учетом коррозионного износа ($c = 2$ мм) не требуется, так как выполняется условие (3.13)

$$\frac{R_y \gamma_c}{\sqrt{\sigma_k^2 - \sigma_k \sigma_M + \sigma_M^2}} \geq 1 + \frac{\Delta + c}{t}.$$

Результаты проверки по формуле (3.13) приведены в таблице П.8.

Проверка условия (3.13)

№ пояса	$t, \text{мм}$	$\Delta, \text{мм}$	$C, \text{мм}$	$\frac{R_y \gamma_c}{\sqrt{\sigma_k^2 - \sigma_k \sigma_m + \sigma_m^2}}$	\geq	$1 + \frac{\Delta + c}{t}$
1	14	0,4	2	1,68	>	1,17
2	11	0,4	2	1,52	>	1,21
3	9	0,4	2	1,45	>	1,27
4	8	0,4	2	1,56	>	1,3
5	6	0,4	2	1,48	>	1,4
6	5	0,4	2	1,67	>	1,48
7	4	0,4	2	2,06	>	1,6
8	4	0,4	2	4,57	>	1,6

Проверка устойчивости стенки резервуара

Потеря устойчивости стенки корпуса резервуара может произойти в результате отдельного или совместного действия сжимающих кольцевых (горизонтальных) и меридиональных (вертикальных) напряжений. Проверка устойчивости производится по формулам (3.14) или по формуле (3.15). Сжимающее кольцевое напряжение (σ_k) определяется по формуле (3.16), где « q_w » определяется по формуле (3.2) при $c_{e1} = 0,5$, а коэффициент « k » принимается для верхней точки стенки резервуара. В этом случае локальное сжатие стенки с наветренной стороны (в зоне угла $\beta = \pm 37,5^\circ$) заменяется сжатием стенки по всему периметру резервуара. Сжимающее меридиональное напряжение (σ_m) в формулах (3.14) и (3.16) определяется по формуле (3.7). Критическое кольцевое напряжение вычисляется по формуле (3.17), а критическое меридиональное напряжение по формуле (3.19).

Проверка устойчивости 1-го пояса.

Редуцированная высота определяется по формуле (3.19):

$$H_r = \sum_{i=1}^n h_{ni} \cdot \left(\frac{t_{\min}}{t_i} \right)^{5/2} = 1,5 \cdot \left[\left(\frac{4}{14} \right)^{5/2} + \left(\frac{4}{11} \right)^{5/2} + \left(\frac{4}{9} \right)^{5/2} + \right]$$

$$+\left(\frac{4}{8}\right)^{5/2} + \left(\frac{4}{6}\right)^{5/2} + \left(\frac{4}{5}\right)^{5/2} + \left(\frac{4}{4}\right)^{5/2} + \left(\frac{4}{4}\right)^{5/2}] = 5,05 \text{ м};$$

$$\sigma_{\kappa} = \frac{0,9q_w r}{t} = \frac{0,9 \cdot 0,169 \cdot 16,3}{0,14} = 177 \text{ кН/м}^2 = 0,177 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{cr\kappa} = 0,55E \cdot \frac{r}{H_r} \left(\frac{t}{r}\right)^{3/2} =$$

$$= 0,55 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot \frac{16,3}{5,05} \cdot \left(\frac{0,014}{16,3}\right)^{3/2} = 8,94 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\kappa} = 0,177 \text{ МПа} < \sigma_{cr\kappa} = 8,94 = 8,94 \text{ МПа} .;$$

$$\frac{r}{t} = \frac{16300}{14} = 1164,3 \Rightarrow c = 0,077 \quad (\text{см. табл. 3.6});$$

$$\sigma_{cr\mu} = \frac{cEt}{r} = \frac{0,077 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,014}{16,3} = 13,23 \text{ МПа};$$

Меридиальное направление определяется по формулам (3.7)

$$\sigma_{\mu} = 1,23 \text{ МПа} \leq \sigma_{cr\mu} = 13,23 \text{ МПа};$$

$$\frac{\sigma_{\kappa}}{\sigma_{cr\kappa}} + \frac{\sigma_{\mu}}{\sigma_{cr\mu}} = \frac{0,177}{8,94} + \frac{1,23}{13,23} = 0,12 < \gamma_c = 1,0 .$$

Все условия выполняются, следовательно, устойчивость 1-го пояса обеспечена. Аналогично выполняется расчет для остальных поясов стенки резервуара. Результаты расчета представлены в табл. П.9.

Результаты проверки устойчивости поясов резервуара

№ пояса	Толщина, мм	Ветровая нагрузка, кН/м ²	$\frac{r}{t} \Rightarrow c$		Кольцевые напряжения	Крит. кольцевые напряжения	Меридианальные напряжения	Крит. меридианальные напряжения	Совместное действие напряжений	Окончательная толщина
1	14	0,269	1164	0,077	0,177	8,94	1,23	13,23	0,12	14
2	11	0,269	1481	0,070	0,225	6,22	1,438	9,45	0,19	11
3	9	0,269	1811	0,070	0,275	4,61	1,634	7,73	0,27	9
4	8	0,269	2037	0,065	0,310	3,86	1,715	6,38	0,35	8
5	6	0,286	2716	0,058	0,413	2,51	2,163	4,27	0,67	6
6	5	0,313	3260	0,052	0,496	1,91	2,472	3,19	1,03	6
7	4	0,340	4075	0,044	0,620	1,36	2,925	2,16	1,81	6
8	4	0,360	4075	0,044	0,420	1,36	2.800	2,16	–	6

Из анализа полученных результатов следует, что устойчивость поясов № 6, 7 и 8 не обеспечена, прежде всего, из-за меридиональных напряжений. Для обеспечения устойчивости толщина этих поясов увеличивается до 6 мм. Окончательная толщина приведена в последнем столбце предыдущей таблицы. После этого следует заново произвести проверку устойчивости этих поясов (в данном примере повторная проверка не приводится).

Расчет сварки соединений

Сварное соединение листов одного пояса между собой рассчитывается на погонное усилие

$$N = \sigma_k t,$$

где σ_k – кольцевое напряжение, определяемое по формуле (3.8);
 t – толщина листов соответствующего пояса стенки.

Сварное соединение поясов стенки между собой рассчитывается на погонное усилие:

$$N = \sigma_m t,$$

где σ_m – определяется по формуле (3.6);

t – расчетная толщина самого тонкого из соединяемых поясов.

При рулонировании все сварные швы стыковые. При поэлементном монтаже все вертикальные швы стыковые, а горизонтальные – угловые. Расчет стыковых и угловых швов выполняется по [3].

Расчет и конструирование шатрового покрытия (см. рис. 2.8)

Поверхность шатрового покрытия описывается формулой (3.39).

Превышение стойки над стенкой резервуара:

$$h = \left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{5} \right) \cdot r = \left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{5} \right) \cdot 16,3 = (2,04 \div 3,26) \text{ м},$$

принимаем $h = 3$ м.

Наименьший прогиб, при котором обеспечивается внешний водоотвод, определяется по формуле (3.40):

$$f \geq \frac{3h}{16} \cdot \left(1 - 0,0875 \frac{r}{h} \right) = \frac{3 \cdot 3}{16} \cdot \left(1 - 0,0875 \cdot \frac{16,3}{3} \right) = 0,290 \text{ м},$$

принимаем прогиб $f = 300$ мм.

Радиус оголовка центральной стойки составит: $r_0 \geq 0,1 r = 0,1 \cdot 16,3 = 1,63$ м, принимаем $r_0 = 2$ м.

Определим погонное меридиональное усилие в шатровой оболочке в месте примыкания к оголовку центральной стойки по формуле (3.43):

$$N_1^B = \frac{q(r^2 - r_0^2)}{2r_0 \sin \varphi_B} = \frac{1,416 \cdot (16,3^2 - 2^2)}{2 \cdot 2 \sin 14^\circ} = 383,0 \text{ кН/м}.$$

где φ_B – угол между горизонталью и касательной в месте примыкания шатровой оболочки к оголовку стойки;

q – расчетная вертикальная нагрузка на 1 м^2 горизонтальной поверхности покрытия:

$$q = q_n + \frac{0,9P_s}{\pi r^2} = 0,45 + \frac{0,9 \cdot 876}{3,14 \cdot 16,3^2} = 1,416 \text{ кН/м}^2.$$

Меридиональное усилие в месте примыкания шатровой оболочки к опорному кольцу определяется по формуле (3.46)

$$N_1^n = N_1^B \cdot \frac{r_0 \cdot \cos \varphi_B}{r \cdot \cos \varphi_0} = 383,0 \cdot \frac{2 \cdot \cos 14^\circ}{16,3 \cdot \cos 7^\circ} = 46 \text{ кН/м}.$$

Первая производная определяется по формуле (3.41):

$$z = \frac{h}{r} + \frac{8f}{3r} \cdot \left[1 - 3 \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right] = \frac{3}{16,3} + \frac{8 \cdot 0,3}{3 \cdot 16,3} \cdot \left[1 - 3 \cdot \left(\frac{16,3 - 2}{16,3} \right)^2 \right] = 0,12.$$

Радиусы кривизны определяются по формулам (3.40) и (3.42):

$$R_1 = \frac{\left[1 + (z')^2 \right]^{3/2}}{z''} = \frac{\left[1 + (0,12)^2 \right]^{3/2}}{-0,016} = -63,85 \text{ м};$$

$$R_2 = x \sin \varphi = (16,3 - 2) \cdot \sin 14^\circ = 3,5 \text{ м};$$

Кольцевое усилие в месте примыкания оболочки покрытия к оголовку центральной стойки определяется по формуле (3.44):

$$N_2 = \left(q \cos \varphi_B - \frac{N_1^g}{R_1} \right) R_2 = \left(1,416 \cos 14^\circ - \frac{383,0}{-63,85} \right) \cdot 3,5 = 25,8 \text{ кН/м}.$$

В качестве материала для покрытия принята сталь С235 с расчетным сопротивлением $R_y = 230$ МПа при толщине листов $t = 2\text{--}20$ мм. Предварительно толщина оболочки покрытия принимается равной 4 мм. Проверка прочности оболочки покрытия в меридиональном, в наиболее напряженном направлении ($\gamma_c = 0,9$):

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{N}{t} = \frac{383,0 \cdot 10^{-2}}{0,4} = 9,6 \text{ кН/см}^2 \leq R_y \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = \\ &= 23,0 \cdot \frac{0,9}{1,1} = 18,8 \text{ кН/см}^2. \end{aligned}$$

Прочность обеспечена.

Требуемый момент инерции опорного кольца определяется из условия обеспечения устойчивости в горизонтальной плоскости (3.47):

$$N_1^n r_k = 46 \cdot 16,3 = 749,8 \text{ кН} \leq N_{cr} = \frac{3EI_x}{r_k^2} = \frac{3 \cdot 2I_x}{16,3^2};$$

$$I_{xTP} = \frac{749,8 \cdot 16,3^2}{3 \cdot 2} = 33\,202 \text{ см}^4.$$

Принимается опорное кольцо из составного швеллера, состоящего из двух уголков 160x12, соединенных листом – 300x10. Геометрические характеристики принятого сечения: $h = 500$ мм, $b = 160$ мм, $s = 10$ мм, $t = 12$ мм, $A = 105,8$ см², $W_x = 1377$ см³, $I_x = 34416$ см⁴. Проверка опорного кольца на устойчивость (3.47):

$$\begin{aligned} N_1^n r_k &= 46 \cdot 16,3 = 749,8 \text{ кН} < N_{cr} = \\ &= \frac{3EI_x}{r_k^2} = \frac{3 \cdot 20\,600 \cdot 34\,416}{1\,605^2} = 825,66 \text{ кН}. \end{aligned}$$

Устойчивость обеспечена. Опорное кольцо поставляется на монтажную площадку в виде отдельных отправочных марок длиной 3–4 м. Стыки элементов опорного кольца также рассчитываются на усилие: $N_1^n r_k$.

Соединения листов, образующих шатровое покрытие в меридиональном направлении рассчитываются на усилие N_1 и в кольцевом направлении на усилие N_2 .

Центральная стойка рассчитывается как центрально сжатый элемент ($\gamma_c = 1$). Сопряжение стойки с покрытием шарнирное, а с фундаментом – жесткое. В соответствии с данной схемой закрепления принимаем коэффициент для определения расчетной длины $\mu = 0,7$. Усилие на центральную стойку определим по формуле (3.48):

$$F = N_1^e 2\pi r_0 \sin \varphi_B = 383 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot \sin 14^\circ = 1164 \text{ кН} .$$

Расчетная длина определяется по формуле:

$$l_{ef} = \mu l = 0,7 \cdot 15 = 10,5 \text{ м} ,$$

где l – длина стойки.

Оптимальная гибкость стойки:

$$\lambda_{\text{опт}} = 5,13 \cdot \sqrt[3]{\frac{l_{ef}^2}{F}} \cdot \sqrt[4]{R_y} = 5,13 \cdot \sqrt[3]{\frac{10,5^2}{1,164}} \cdot \sqrt[4]{240} = 92.$$

Коэффициент продольного изгиба $\varphi = 0,6$. После этого определяется требуемая площадь и радиус инерции сечения:

$$A_{\text{тр}} = \frac{F\gamma_n}{\varphi R_y \gamma_c} = \frac{1164 \cdot 1,1}{0,6 \cdot 24,0 \cdot 1,0} = 88,9 \text{ см}^2 ,$$

$$i_{\text{тр}} = \frac{l_{ef}}{\lambda_{\text{опт}}} = \frac{1050}{92} = 11,4 \text{ см}.$$

По сортаменту ГОСТ 1074–63 выбираем круглую трубу 377/8 мм: $A = 92,7 \text{ см}^2$, $i = 13,1 \text{ см}$. Проверим выбранное сечение на устойчивость:

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i} = \frac{1050}{13,1} = 80 \Rightarrow \varphi = 0,686;$$

$$\sigma = \frac{F}{\varphi A} = \frac{1164}{0,686 \cdot 92,7} = 18,3 \text{ кН/см}^2 =$$

$$= R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 24,0 \cdot \frac{1,0}{1,1} = 21,8 \text{ кН/см}^2 .$$

Устойчивость обеспечена.

Учебное издание

ДАВЫДОВ Евгений Юрьевич

**СТАЛЬНЫЕ НАЗЕМНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ.
ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА**

Пособие по дисциплине
«Металлические конструкции»
для студентов строительных специальностей

Редактор *О. В. Ткачук*
Компьютерная верстка *К. Д. Николаевич*

Подписано в печать 29.02.2016. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5.29. Уч.-изд. л. 4,14. Тираж 100. Заказ 1045.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

