

Г.А. Нехасев

**Проектирование и расчет
стальных цилиндрических
резервуаров и газгольдеров
низкого давления**



Нехаев Геннадий Алексеевич

**Проектирование и расчет стальных
цилиндрических резервуаров и
газгольдеров низкого давления**

Издательство [АСВ](#)

Год 2005

УДК: 624.014 (075.8)

Описание:

Изложены основные положения по сбору нагрузок, расчету и конструированию элементов и узлов стальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров низкого давления. Приведены примеры расчета конструкций резервуаров, газгольдеров и их покрытий. Предназначено студентам инженерной специальности 'Промышленное и гражданское строительство' для курсового и дипломного проектирования.

ISBN: 5-93093-366-9

Количество страниц: 216

Содержание

Введение

Глава I. Общие сведения о резервуарах и газгольдерах низкого давления

- 1.1. Классификация и назначение резервуаров
- 1.2. Краткая характеристика и назначение газгольдеров низкого давления
- 1.3. Стали, применяемые для резервуаров и газгольдеров низкого давления
- 1.4. Сварные соединения и швы

Глава II. Основные положения расчета и конструирования листовых конструкций

- 2.1. Некоторые сведения из теории расчета тонких оболочек вращения
- 2.2. Расчет на устойчивость листовых конструкций
- 2.3. Краевой эффект в месте сопряжения цилиндрических круговых оболочек с плоскими днищами
- 2.4. Расчет листовых обшивок
- 2.5. Постоянные и временные нагрузки на резервуары и газгольдеры низкого давления

Глава III. Вертикальные цилиндрические резервуары низкого давления

- 3.1. Основания и фундаменты под резервуары
- 3.2. Конструирование и расчет днищ резервуаров
 - 3.2.1. Пример расчета окраек вертикального цилиндрического резервуара объемом 5000 м³
- 3.3. Определение оптимальных габаритных размеров резервуара
- 3.4. Расчет и конструирование стенок резервуара
- 3.5. оптимизация толщин листов стенки по высоте резервуара
- 3.6. Пример расчета днища и стенки резервуара объемом 30000 м³
- 3.7. Стационарные крыши вертикальных резервуаров низкого давления
- 3.8. Расчет и конструирование элементов конического покрытия
- 3.9. Пример расчета элементов конического покрытия
- 3.10. Расчет и конструирование элементов сферического покрытия

- 3.10.1. Характеристика ребристо-кольцевого купола
- 3.10.2. Нагрузки на купол
- 3.10.3. Расчет радиальных ребер купола
- 3.10.4. Расчет кольцевых элементов
- 3.11. Пример расчета элементов ребристо-кольцевого купола
 - 3.11.1. Установление габаритных размеров сферического покрытия
 - 3.11.2. Сбор нагрузок на купол
 - 3.11.3. Расчет радиального ребра купола
 - 3.11.4. Расчет кольцевых элементов купола
- 3.12. Расчет и конструирование плавающей крыши
- 3.13. Пример расчета плавающей крыши
- 3.14. Эксплуатационное оборудование вертикального резервуара

Глава IV. Горизонтальные цилиндрические резервуары для нефти и нефтепродуктов

- 4.1. Основные особенности конструирования горизонтальных резервуаров
- 4.2. Напряженное состояние стенки и днищ горизонтальных резервуаров
- 4.3. Расчет стенки резервуара на прочность и устойчивость
- 4.4. Пример расчета стенки горизонтального резервуара
- 4.5. Расчет плоских и конических днищ горизонтального резервуара
- 4.6. Конструкция и расчет сопряжения плоских днищ со стенкой горизонтального резервуара
- 4.7. Пример расчета плоского днища горизонтального резервуара
- 4.8. Пример расчета конического днища горизонтального резервуара
- 4.9. Расчет опорного кольца жесткости резервуара
- 4.10. Пример расчета опорного кольца жесткости с диафрагмой в виде треугольника

Глава V. Мокрый газгольдер

- 5.1. Особенности конструирования элементов мокрого газгольдера
- 5.2. Определение габаритных размеров частей газгольдера и их масс
- 5.3. Расчет стенок газгольдера
- 5.4. Пример расчета элементов мокрого газгольдера
 - 5.4.1. Определение основных размеров газгольдера

- 5.4.2. Определение веса пригруза
- 5.4.3. Определение толщины листов стенки резервуара из условия прочности
- 5.4.4. Определение толщины листов стенок колокола и телескопа
- 5.4.5. Расчет и конструирование элементов сферического покрытия колокола
 - 5.4.5.1. Конструирование элементов покрытия колокола
 - 5.4.5.2. Сбор нагрузок на покрытие
 - 5.4.5.3. Расчет радиального ребра купола
 - 5.4.5.4. Расчет и конструирование опорного кольца покрытия купола
 - 5.4.5.5. Расчет и конструирование промежуточного кольца покрытия

Глава VI. Сухие газгольдеры переменного объема

- 6.1. Сухой газгольдер поршневого типа
- 6.2. Пример расчета элементов сухого газгольдера поршневого типа
 - 6.2.1. Определение габаритных размеров газгольдера
 - 6.2.2. Определение толщины стенки газгольдера из условия прочности стыковых швов
 - 6.2.3. Расчет горизонтальных колец жесткости на ветровую нагрузку
 - 6.2.4. Расчет основных элементов ребристого покрытия газгольдера
 - 6.2.5. Расчет основных элементов поршня
- 6.3. Сухой газгольдер с гибкой секцией
- 6.4. Пример расчета элементов сухого газгольдера с гибкой секцией
 - 6.4.1. Определение габаритных размеров газгольдера
 - 6.4.2. Расчет стенки газгольдера
 - 6.4.3. Расчет конструкций шайбы

Приложение

Библиографический список использованных источников

Листовыми конструкциями называют емкостные конструкции, состоящие из металлических листов и предназначенные для хранения или транспортирования жидкостей, газов и сыпучих материалов. Они занимают особое место среди всего многообразия металлических конструкций. Для листовых конструкций характерно двухосное напряженное состояние, а в местах сопряжения различных оболочек, расположения колец жесткости, примыкания к днищам возникают местные напряжения, называемые краевым эффектом. Нормы проектирования не требуют обязательной проверки листовых конструкций на напряжения в зонах краевого эффекта. Однако в ответственных случаях необходимо учитывать повышенный уровень напряжений в этих зонах.

К листовым конструкциям относятся:

- резервуары для хранения различных жидкостей;
- газгольдеры для хранения и распределения газов;
- бункеры и силосы для хранения и перегрузки сыпучих материалов;
- трубопроводы большого диаметра ($D > 0,5$ м), используемые для транспортирования нефтепродуктов, газа, воды, размельченных или разжиженных веществ;
- специальные конструкции металлургической, химической и других отраслей промышленности (кожухи доменных печей, воздухонагревателей, сосуда химической и нефтегазовой аппаратуры и т.п.);
- дымовые и вентиляционные трубы;
- защитные сооружения – оболочки АЭС;
- мембранные висячие покрытия.

Для листовых конструкций характерно двухосное напряженное состояние, а в местах сопряжения оболочек, у колец жесткостей и т.п. – наличие местных изгибающих моментов, называемых краевым эффектом. Сварные швы листовых конструкций должны быть прочноплотными. При конструировании листовых конструкций необходимо предусматривать промышленные методы их изготовления и монтажа путем применения:

- лент и листов больших размеров;
- способа рулонирования, изготовления заготовок в виде скорлуп и др.;
- раскроя, обеспечивающего минимальное количество отходов;
- минимального количества сварных швов, выполняемых на монтаже.

Среди многообразия листовых конструкций можно выделить по принципу единой методики расчета и конструирования цилиндрические резервуары и газгольдеры (низкого давления), которые имеют широкое распространение из-за простоты изготовления и монтажа.

В зависимости от свойств хранимой жидкости, режима эксплуатации и климатических особенностей района строительства определяется форма и тип резервуара. Широкое распространение получили вертикальные и горизонтальные цилиндрические резервуары. Вертикальные резервуары со стационарной крышей в большинстве своем являются сосудами низкого давления (с избыточным давлением в паровоздушной зоне до 2 кПа (200 мм водяного столба и вакуумом до 0,25 кПа). Эти резервуары просты в изготовлении и монтаже, экономичны по расходу металла.

Вертикальные цилиндрические резервуары повышенного давления (с избыточным давлением 10...70 кПа) имеют достаточно сложные конструктивные решения крыш. К этому типу резервуаров относятся изотермические резервуары для хранения сжиженных газов. Изотермические резервуары относят к специальным типам резервуаров, поскольку они имеют свои особенности расчета и конструирования. Изотермические резервуары изготавливаются из особых марок сталей; при расчетах требуется учет температурных деформаций; опираются они на искусственное основание. ПРАВИЛА ПБ 03-381-00 не распространяются на изотермические резервуары.

В связи с этим в учебном пособии предпринята попытка более детального рассмотрения и систематизации имеющихся сведений по расчету и конструированию вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления, а также горизонтальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов при избыточном давлении до 70 кПа. В этом случае несущая способность горизонтальных резервуаров определяется по первой группе предельных состояний.

Газгольдеры предназначены для хранения газов и регулирования их давления. Они делятся на две группы: переменного объема (мокрые и сухие) и постоянного объема. Газгольдеры переменного объема называются газгольдерами низкого давления (до 5 кПа), постоянного объема (с избыточным давлением 250...2000 кПа) – сосудами высокого давления. Газгольдеры низкого давления рассчитывают по предельным состояниям. Поэтому в пособии рассматриваются только газгольдеры низкого давления.

Круглая форма в плане вертикальных резервуаров и газгольдеров вызывает необходимость конструирования покрытий над ними в виде куполов (реже висячих систем). По своей конструкции купола бывают ребристыми, ребристо-кольцевыми и сетчатыми. Наиболее приемлемыми куполами для рассматриваемых сооружений являются ребристо-кольцевые и сетчатые. Чаще всего применяются ребристо-кольцевые купола, собираемые из криволинейных трапецевидных стальных щитов.

В общем случае сбор нагрузок и расчет купола представляют достаточно сложную задачу даже с применением ЭВМ.

С целью лучшего понимания методики определения и распределения усилий в элементах купола, а также упрощения расчета узлы купола конструируют шарнирными. При этом такая купольная система с применением щитов становится статически определимой, расчленяемой на простые стержневые элементы.

Наряду с известными положениями автор излагает и некоторые результаты собственных исследований.

Изложенный в учебном пособии материал иллюстрирован конструктивными схемами и примерами расчета, что, несомненно, будет способствовать более глубокому усвоению студентами теоретического материала.

Автор выражает глубокую признательность зав. кафедрой «Металлические конструкции» МГСУ докт. техн. наук, профессору Кудишину Ю. И., сотрудникам кафедры канд. техн. наук, профессору Соболеву Ю. В. и канд. техн. наук, доценту Астряб С. М. за нелегкий труд по рецензированию данной работы и ценные замечания.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЗЕРВУАРАХ И ГАЗГОЛЬДЕРАХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И НАЗНАЧЕНИЕ РЕЗЕРВУАРОВ

Резервуары низкого давления служат для хранения воды, нефти и нефтепродуктов. В зависимости от положения в пространстве цилиндрические резервуары делят на вертикальные (рис. 1.1) и горизонтальные (рис. 1.2).

Вертикальные цилиндрические резервуары имеют днище, стенку, крышу, эксплуатационное оборудование. В них хранятся нефтепродукты при малой их оборачиваемости (10–12 раз в год). При большей оборачиваемости нефтепродуктов применяются резервуары с плавающей крышей и понтоном. Вертикальные резервуары применяют для хранения легковоспламеняющихся жидкостей (например, бензина) при объемах до 20000 м³; для хранения горючих жидкостей – до 50000 м³.

Объем вертикальных цилиндрических резервуаров колеблется от 100 до 50000 м³ и более и регламентируется нормальным рядом: 100, 200, 300, 400, 500, 700, 1000, 2000, 3000, 5000, 10000, 20000, 30000 и 50000 м³. Все резервуары нормального ряда (исключая в некоторых случаях резервуары объемом 50000 м³) строят индустриальным методом из рулонных заготовок.

Резервуары объемом 50000 м³ сооружают как из рулонных заготовок, так и полистовым способом.

Проектирование резервуаров объемом более 50000 м³ выполняют по индивидуальным техническим условиям специализированные организации.

В зависимости от объема и места расположения вертикальные резервуары подразделяются на три класса:

- класс I – особо опасные резервуары: объемами 10000 м³ и более, а также резервуары объемами 5000 м³ и более, расположенные непосредственно по берегам рек, крупных водоемов и в черте городской застройки;
- класс II – резервуары повышенной опасности: объемами от 5000 до 10000 м³;
- класс III – опасные резервуары: объемами от 100 до 5000 м³.

Степень опасности учитывается при проектировании специальными требованиями к материалам, а также при расчете коэффициентом надежности по назначению ($\gamma_n = 1,1$ – для I класса; $\gamma_n = 1,05$ – для II класса; $\gamma_n = 1,0$ – для III класса).

Резервуары этого типа выполняются, в основном, наземными.

Крупные резервуары для хранения нефтепродуктов в районах с нормативным весом снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли до 1,5 кПа включительно могут иметь плавающие крыши без стационарной крыши. Плавающие крыши могут быть следующих типов:

- однодечной конструкции (однодисковые) с герметичными коробами, расположенными по периметру (рис. 1.3);
- двухдечной конструкции (двухдисковые), состоящей из герметичных коробов, образующих всю поверхность крыши;
- поплавкового типа.

Плавающие крыши двухдечной конструкции характеризуются непотопляемостью и высокой жесткостью. Однако из-за большой металлоемкости и трудоемкости изготовления они применяются в единичных случаях.

Плавающие крыши поплавкового типа в России пока отсутствуют, но исследования по ним проводятся. Так, в [21] предлагается плавающая крыша поплавкового типа из рулонных заготовок, в которой повышена плавучесть и жесткость центральной части настила по сравнению с однодечной крышей.

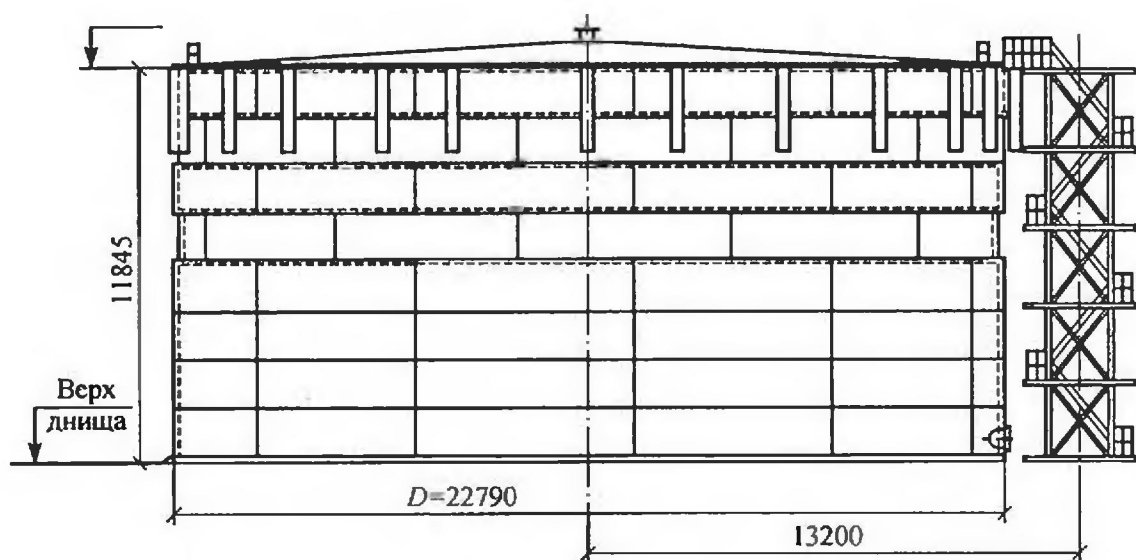


Рис. 1.1. Вертикальный цилиндрический резервуар

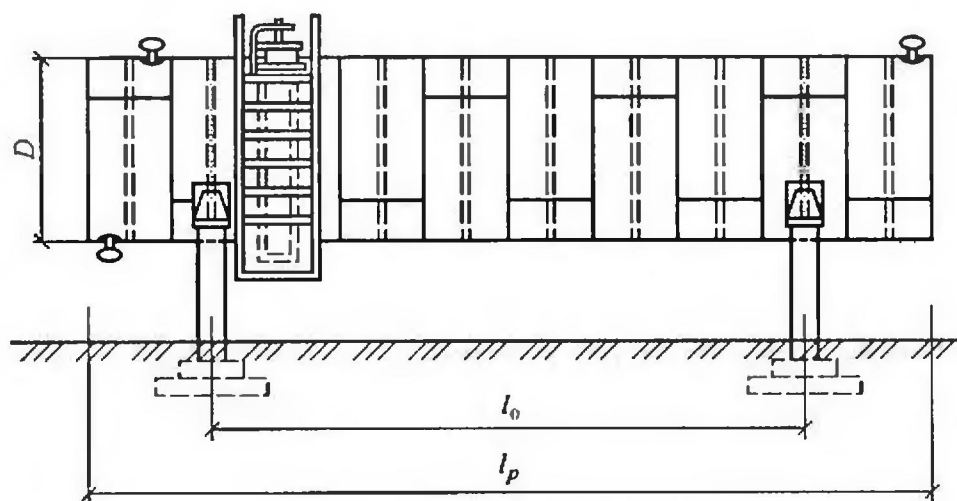


Рис. 1.2. Горизонтальный цилиндрический резервуар

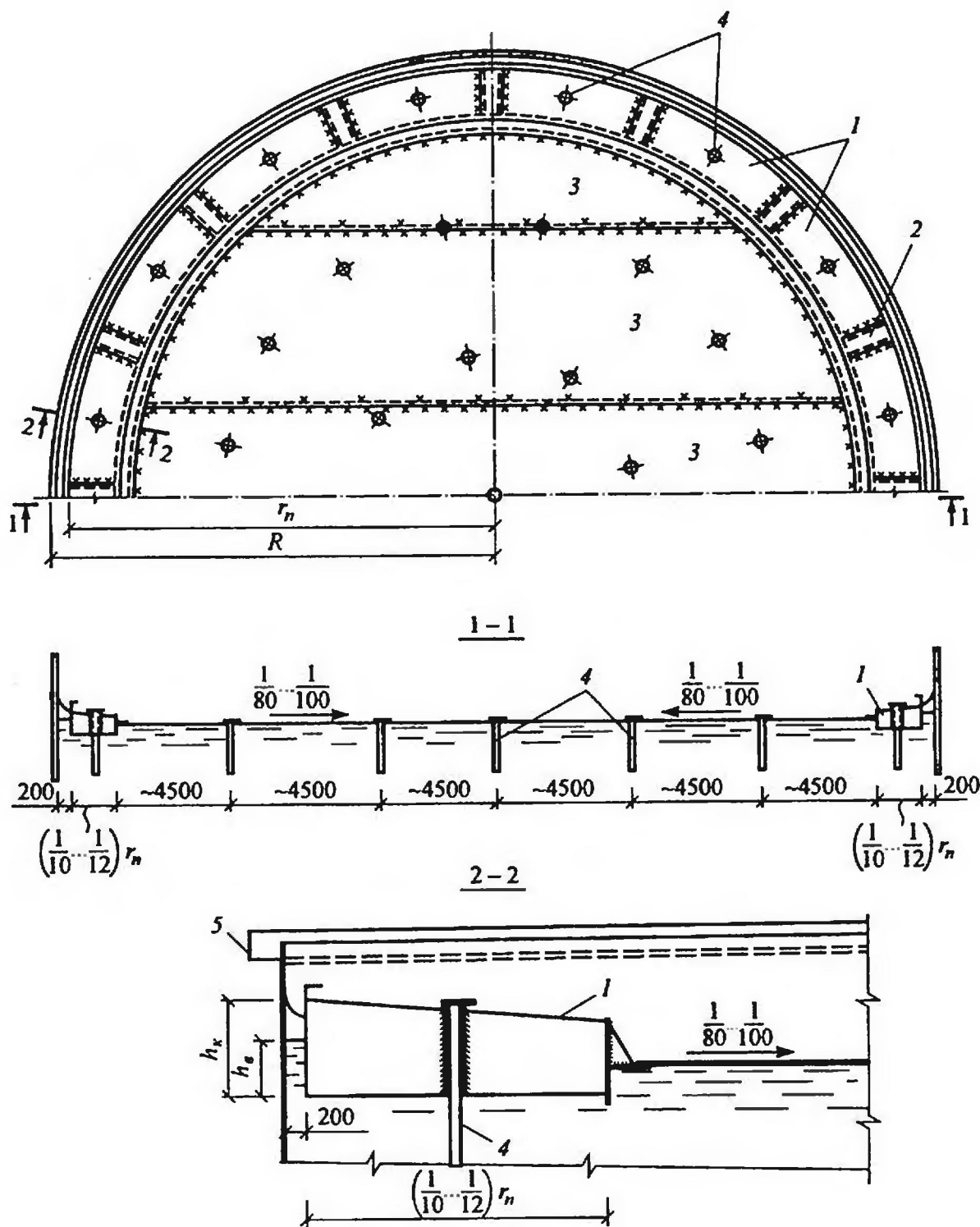


Рис. 1.3. Схема однослойной гибкой плавающей крыши:

1 – кольцевые короба; 2 – монтажные соединения коробов; 3 – мембрана;
4 – трубчатые стойки; 5 – кольцевой балкон

Резервуары с плавающей крышей должны иметь верхнее кольцо жесткости, шириной не менее 800 мм, устанавливаемое на верхнем поясе стенки и используемое в качестве обслуживающей площадки. Доступ на плавающую крышу должен обеспечиваться катучей лестницей. Плавающие крыши должны иметь опорные стойки высотой около 1800 мм для осмотра и ремонта крыши и днища, минимум один люк-лаз диаметром не менее 600 мм.

В северных снежных районах, а также в районах, где возможны пыльные бури, применяют резервуары со стационарной крышей и понтоном. Понтон состоит из понтонного кольца, обеспечивающего его плавучесть, и центральной части из плоских стальных листов толщиной 4 мм. Понтонное кольцо выполняется из замкнутых коробов или открытых отсеков, разделенных радиальными стенками. Между стенкой резервуара и наружной стенкой понтонного кольца имеется зазор шириной 200...275 мм, который заполняется уплотняющим затвором. Возможны варианты понтонов по типу плавающих крыш.

Горизонтальные цилиндрические резервуары предназначены для хранения нефтепродуктов под избыточным давлением до 70 кПа (7000 мм вод. столба). Резервуары имеют простую форму, транспортабельны по железной дороге, что ограничивает диаметр до 3,25 м. В отдельных случаях диаметр резервуара может достигать до 4,0 м. Наибольшее распространение получили резервуары для нефтепродуктов объемом 5, 10, 25, 50, 75 и 100 м³. Горизонтальные резервуары могут быть надземного и подземного расположения. Здесь рассматриваются только надземные резервуары, опирающиеся на две опоры.

1.2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И НАЗНАЧЕНИЕ ГАЗГОЛЬДЕРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Газгольдеры применяют для хранения природного и искусственного газа на металлургических, коксохимических и газовых заводах, в химической и нефтяной промышленности, в городском хозяйстве. По своим технологическим особенностям газгольдеры низкого давления относятся к газгольдерам переменного объема (постоянного давления не более 5 кПа, что соответствует 500 мм вод. столба). В газгольдерах переменного объема давление газа сохраняется за счет веса подвижных частей в результате их опускания или подъема. По конструкции газгольдеры переменного объема разделяют на мокрые и сухие. В мокрых газгольдерах нижняя часть (резервуар) заполнена водой, которая образует водяной затвор, обеспечивающий герметичность газового пространства. В сухих газгольдерах вода отсутствует. Подвижная часть, создающая давление газа, представляет собой конструкцию в виде поршня.

Мокрые газгольдеры применяют для хранения газов, не вызывающих интенсивной коррозии стали. Типовые мокрые газгольдеры имеют вместимость 100...30000 м³ и состоят из вертикального цилиндрического резервуара, заполненного водой, одного или нескольких промежуточных звеньев (телескопов), колокола (цилиндрическая оболочка, открытая снизу с полой сферической кровлей) и направляющих (рис. 1.4). Через дно резервуара

под колокол подводят газопроводы для подачи и расходования газа. Основными недостатками мокрых газгольдеров являются существенные колебания давления газа при опускании и подъеме подвижных частей, а также трудности их обслуживания при отрицательной температуре.

Сухие газгольдеры применяют в случае, когда хранимые газы имеют высокую концентрацию (до 99,9% и выше) и не допускают увлажнения (этилен, пропилен и др.). Объем сухих газгольдеров 10...600 тыс. м³. Конструкция (рис. 1.5) их состоит из цилиндрической оболочки с плоским дном и сферической кровли каркасного типа. Внутри газгольдера размещается специальная конструкция в виде шайбы, перемещающейся по вертикали под давлением газа наподобие поршня. Между корпусом и вертикальными стенками шайбы располагается либо уплотняющий затвор (газгольдер поршневого типа), либо кольцевой фартук из прорезиненной ткани, герметично соединенный с корпусом и шайбой для изоляции газового пространства (газгольдер с гибкой секцией).

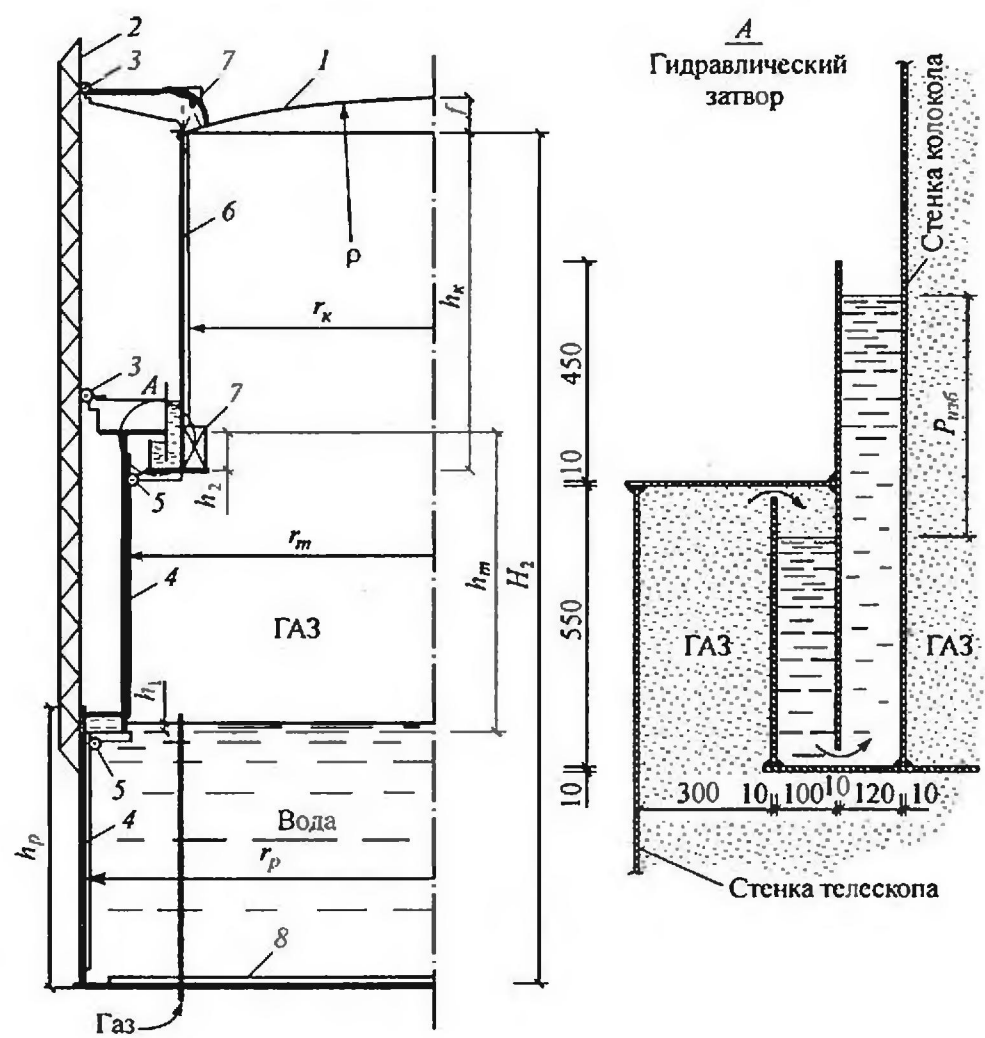


Рис. 1.4. Схема двухзвенного мокрого газгольдера:

- 1 – покрытие колокола; 2 – внешние направляющие; 3 – внешние ролики;
- 4 – внутренние направляющие; 5 – внутренние ролики; 6 – трубчатые стойки;
- 7 – пригруз; 8 – подкладные балки

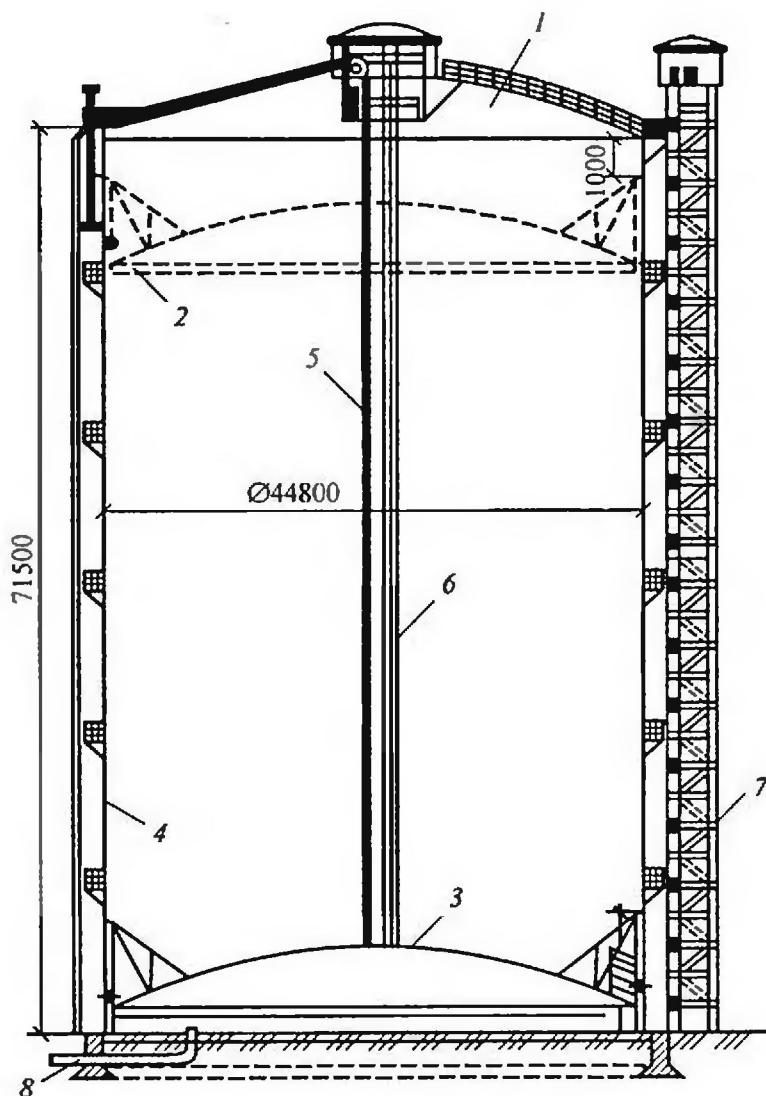


Рис. 1.5. Схема сухого газгольдера объемом 100000 м³:
 1 – площадка фонаря; 2 – шайба в верхнем положении;
 3 – шайба в нижнем положении; 4 – обшивка; 5 – цепная лестница;
 6 – подъемная клеть; 7 – наружный подъемник; 8 – подвод газа

1.3. СТАЛИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ РЕЗЕРВУАРОВ И ГАЗГОЛЬДЕРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Согласно ПРАВИЛ ПБ 03-381-00 [24] все элементы вертикальных цилиндрических резервуаров разделяются на две группы.

• *Основные конструкции:*

А – стенка, приваренные к стенке листы днища или кольцевые окрайки, обечайки люков и патрубков в стенке и фланцы к ним, привариваемые к стенке усиливающие накладки, опорное (верхнее) кольцо жесткости;

Б – центральная часть днища, анкерные крепления, каркас крыши (включая фасонки), настил крыши, самонесущие конические крыши, плавающие крыши, промежуточные кольца жесткости, оболочки люков и патрубков на крыше.

• *Вспомогательные конструкции:* лестницы, площадки, ограждения и др.

Для основных конструкций подгруппы *А* должна применяться только спокойная сталь с классами прочности по ГОСТ 27772-88, поставляемая для низкоуглеродистых сталей по ГОСТ 14637-79*, для низколегированных сталей – по ГОСТ 19281-73* и техническим условиям, указанным в табл. 1.1.

Основные конструкции подгруппы *Б* должны выполняться из спокойной или полуспокойной стали по ГОСТ 27772-88.

Для вспомогательных конструкций наряду с выше перечисленными сталями с учетом температурных условий эксплуатации возможно применение стали С 235 по ГОСТ 27772-88.

Таблица 1.1

Значения температур гарантии ударной вязкости

Класс прочности	Минимальная температура, при которой гарантируется ударная вязкость, °С					
	+ 10	0	– 10	– 15	– 20	– 30
255	С 255 ГОСТ 27772 ВСтЗсп 20,1–40 мм	С 255 ГОСТ 27772 ВСтЗсп 10,1–20 мм	С 255 ГОСТ 27772 ВСтЗсп 4–10 мм			
315			С 315 ТУ 14-104-133-92 40,1–50 мм	С 315 ТУ 14-104-133-92 20,1–40 мм	С 315 ТУ 14-104-133-92 4–20 мм	
345					С 345 ГОСТ 27772 09Г2С 40,1–50 мм	С 345 ГОСТ 27772 09Г2С 20,1–40 мм
440					ТУ 14-1-5270-94 10Г2СБ 8–25 мм	
						ТУ 14-1-4349-87 08Г2БТ-У 08Г2Б-У 8–16 мм

Указанную выше классификацию конструкций можно распространить и на горизонтальные цилиндрические резервуары.

При проектировании газгольдеров низкого давления следует применять марки сталей по СНиП II-23-81* [28] в соответствии с указаниями СНиПа 2.09.03-85 [27].

Некоторые марки сталей и их расчетные сопротивления по пределу текучести R_y приведены в табл. 1.2.

Корпус вертикальных резервуаров вместимостью 50000 м³ и более следует выполнять из низколегированных сталей типа 09Г2, 09Г2С гр. 2 и т. п., а также предварительно напряженным (Беленя Е. И. и др. Предварительно напряженные металлические листовые конструкции. – М.: Стройиздат, 1979. – 192 с.).

Для конструкций резервуаров и газгольдеров применяется прокат тонколистовой из углеродистой стали по ГОСТ 16523-97, прокат листовой горячекатаный по ГОСТ 19903-74*, прокат толстолистовой из углеродистой стали обыкновенного качества по ГОСТ 14637-89*, сталь листовая марки 09Г2ФБ и 10Г2ФБ улучшенной свариваемости и хладостойкости – по ТУ 14-1-4083-86.

Таблица 1.2

Выборка марок сталей и R_y

Класс стали	Марка стали	Толщина проката, мм	R_y , МПа		ГОСТ или ТУ
			листовой	фасонный	
С 245	ВСт3пс6	≤ 20	240		ГОСТ 380-71**
	ВСт3пс6	≤ 30		240	
	ВСт3пс6-1	≤ 20	240		ТУ 14-1-3023-80
	ВСт3пс6-1	≤ 30		240	
С 255	ВСт3сп5				ГОСТ 380-71**
	ВСт3Гпс5				ГОСТ 380-71**
	ВСт3сп5-1	≤ 10	240	250	ТУ 14-1-3023-80
	ВСт3Гпс5-1	11...20	240	240	ТУ 14-1-3023-80
	ВСт3пс6	≤ 20	230	230	ГОСТ 380-71**
С 275	ВСт3пс6-2	≤ 10	270	270	ТУ 14-1-3023-80
		11...20	260	270	
С 285	ВСт3сп5-2	≤ 10	270	280	ТУ 14-1-3023-80
		11...20	260	270	

Листовая сталь изготавливается толщиной 4...50 мм, шириной 1500...3000 мм, длиной 6000...12000 мм с обрезными кромками. Сталь должна поставляться с симметричным расположением поля допуска по толщине, либо с несимметричным расположением поля допуска по толщине, но имеющим постоянное предельное нижнее отклонение, равное 0,3 мм.

По точности изготовления листовой прокат должен применяться:

- по толщине: ВТ – высокая, АТ – повышенная;
- по ширине: АШ – повышенная, БШ – нормальная;
- по плоскости: ПО – особо высокая, ПВ – высокая.

Требования к точности по толщине, ширине и длине должны соответствовать ГОСТ 19903-74*.

Предельные отклонения по толщине листов

Толщина, мм	Предельные отклонения по толщине листов для симметричного поля допусков при точности ВТ и АТ при ширине, мм					
	1500		св. 1500 до 2000		св. 2000 до 3000	
	ВТ	АТ	ВТ	АТ	ВТ	АТ
от 5 до 10 вкл.	$\pm 0,4$	$\pm 0,45$	$\pm 0,45$	$\pm 0,50$	$\pm 0,50$	$\pm 0,55$
св. 10 до 20 вкл.	$\pm 0,4$	$\pm 0,45$	$\pm 0,45$	$\pm 0,50$	$\pm 0,55$	$\pm 0,60$
св. 20 до 30 вкл.	$\pm 0,4$	$\pm 0,50$	$\pm 0,50$	$\pm 0,60$	$\pm 0,60$	$\pm 0,70$

Сортаменты горячекатаных профилей:

- ГОСТ 8509-93 – для равнополочных уголков;
- ГОСТ 8510-86* – для неравнополочных уголков;
- ГОСТ 8239-89 – для двутавров (с уклоном граней полок);
- ГОСТ 8240-89 – для швеллеров;
- ГОСТ 26020-83 – для двутавров с параллельными гранями полок.

Выбор марки стали для основных элементов конструкций должен производиться с учетом требуемых класса прочности, ударной вязкости, толщины проката. Нормированная величина ударной вязкости зависит от гарантированного предела текучести и направления вырезки образцов (поперечных или продольных). На поперечных образцах для листов с пределом текучести 345 МПа и ниже она равна 35 Дж/см²; для листов с более высоким гарантированным пределом текучести она составляет не менее 50 Дж/см². Для фасонного проката определение ударной вязкости производится на продольных образцах.

1.4. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И ШВЫ

Сварные соединения листовых конструкций резервуаров и газгольдеров выполняются встык, внахлестку и впритык. Высокую надежность обеспечивает соединение встык. Соединения встык с накладками применяются реже из-за значительного увеличения протяженности сварных швов и концентрации напряжений в зоне шва. Соединения внахлестку рекомендуются при наличии небольших усилий. Для наиболее напряженных стыковых швов следует применять физические способы контроля качества швов.

Ручная сварка должна проводиться по ГОСТ 5264, полуавтоматическая и автоматическая сварки – по ГОСТ 8713. Сварные швы соединений должны быть плотно-прочными и соответствовать основному металлу по показателям стандартных механических свойств металла шва: пределу текучести, временному сопротивлению, относительному удлинению, ударной вязкости, углу загиба.

Стыковые соединения деталей неодинаковой толщины при разнице, не превышающей указанных в табл. 1.4 значений, могут выполняться также, как и соединения деталей одинаковой толщины; конструктивные элементы разделки кромок и размеры сварочного шва следует выбирать по большей толщине.

Допускаемые разницы толщин деталей

Толщина тонкой детали, мм	Допускаемая разница толщины, мм
до 4	1
свыше 4 до 20	2
свыше 20 до 30	3
свыше 30	4

При разности в толщине свариваемых деталей свыше значений, указанных в табл. 1.4, на деталях, имеющих большую толщину, должен быть сделан скос под углом 15° с одной или двух сторон до толщины тонкой детали. При этом конструкцию разделки кромок и размеры сварного шва следует выбирать по меньшей толщине.

Для деталей толщиной 4–5 мм катет углового шва должен быть равен 4 мм. Для деталей большей толщины катет углового шва определяется расчетом или конструктивно, но должен быть не менее 5 мм.

Заводские сварные соединения рулонных заготовок выполняются встык.

Нахлесточное соединение со сваркой с одной стороны допускается при сборке днища и крыши из рулонных заготовок с величиной нахлестки не менее 30 мм. При листовой сборке днищ и крыш допускаются сварные соединения листов встык на подкладке и нахлесточные соединения с величиной нахлестки $5t$, но не менее 30 мм.

Вертикальные и горизонтальные соединения стенки резервуаров и газгольдеров должны быть стыковыми с полным проплавлением по толщине листов.

Расстояния между швами патрубков, усиливающих листов и швами стенки вертикального резервуара должны быть не менее: до вертикальных швов – 250 мм, до горизонтальных швов – 100 мм. Вертикальные соединения первого пояса стенки вертикального резервуара должны располагаться на расстоянии не менее 100 мм от стыков окроек днища.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

2.1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ РАСЧЕТА ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ

Расчетной схемой стенок и днищ резервуаров и газгольдеров является оболочка вращения.

Срединная поверхность оболочки вращения имеет ось симметрии и два радиуса кривизны, перпендикулярных этой поверхности: r_1 – меридиональный радиус, образующий кривую вращения, и r_2 – кольцевой радиус вращения, имеющий начало на оси симметрии. Сферическая оболочка вращения характеризуется соотношением $r_1 = r_2$; цилиндрическая – соотношениями $r_1 = \infty$, $r_2 = r = \text{const}$; коническая – соотношениями $r_1 = \infty$, $r_2 \cdot \sin \varphi = r$, где φ – угол наклона радиуса r_2 с осью симметрии.

При отношении r/t (t – толщина оболочки) более 30 оболочка считается тонкой. При этом нормальные напряжения распределяются по толщине оболочки равномерно. Промышленные листовые конструкции рассчитываются как тонкие оболочки.

Рассмотрим равновесие вырезанного элемента оболочки толщиной t со сторонами ds_1 и ds_2 (рис. 2.1, 2.2), на который действует равномерно распределенная нагрузка интенсивностью P , направленная перпендикулярно к срезанной плоскости элемента. Спроектируем все силы, действующие на элемент, на направление радиуса кривизны

$$2\sigma_1 \cdot t \cdot ds_1 \cdot \sin d\alpha + 2\sigma_2 \cdot t \cdot ds_2 \cdot \sin d\varphi = P \cdot ds_1 \cdot ds_2$$

Так как при малых углах $\sin d\alpha = ds_2/2r_1$; $\sin d\varphi = ds_1/2r_2$, то, подставив эти выражения в уравнение равновесия и разделив на $ds_1 \cdot ds_2$, получим

$$\frac{\sigma_1}{r_1} + \frac{\sigma_2}{r_2} = \frac{P}{t}, \quad (2.1)$$

где σ_1 – напряжение вдоль образующей; σ_2 – кольцевое напряжение.

Рассмотрим частные случаи оболочек. Для цилиндрической оболочки $r_1 = \infty$ и получим кольцевые напряжения

$$\sigma_2 = \frac{P \cdot r_2}{t}, \quad (2.2)$$

Для сферической оболочки $r_1 = r_2 = r$ и

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{P \cdot r}{2t}. \quad (2.3)$$

Таким образом, при $r_2 = r$ сферическая оболочка испытывает в два раза меньшие напряжения, чем цилиндрическая.

Общая проверка прочности оболочки вращения производится по приведенным напряжениям, т.е.

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} - \sigma_1 \sigma_2 \leq \gamma_c \cdot R_{wy}, \quad (2.4)$$

где γ_c – коэффициент условия работы конструкции, определяемый по табл. 2.1;
 R_{wy} – расчетное сопротивление стыкового шва на растяжение.

Таблица 2.1

Значения γ_c для листовых конструкций

Элементы	γ_c
Стенки вертикальных цилиндрических резервуаров при расчете на прочность:	
нижний пояс	0,7
остальные пояса	0,8
сопряжения стенки резервуара с днищем	1,2
То же при расчете элементов на устойчивость	1,0
Сферические и конические покрытия распорной конструкции при расчете по безмоментной теории	0,9
Сжатый пояс жесткости мокрого газгольдера	0,9

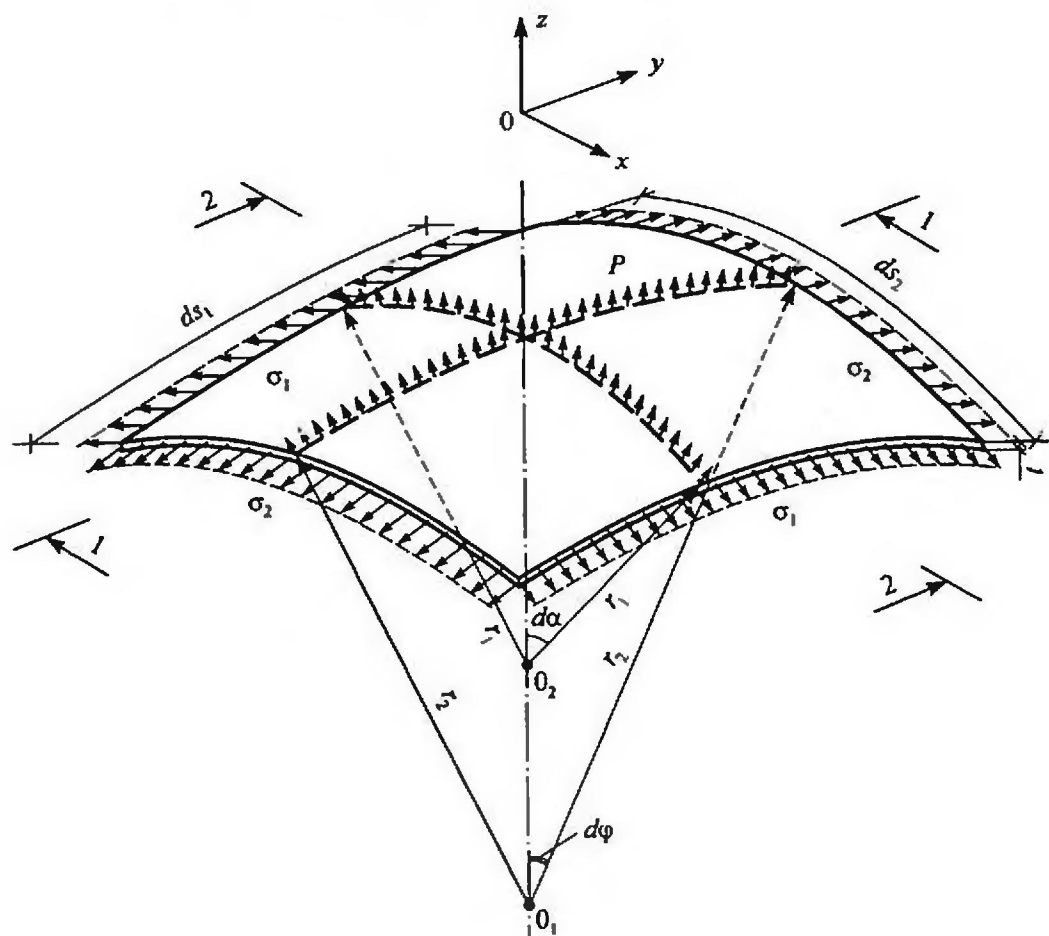


Рис. 2.1. К расчету тонкой оболочки

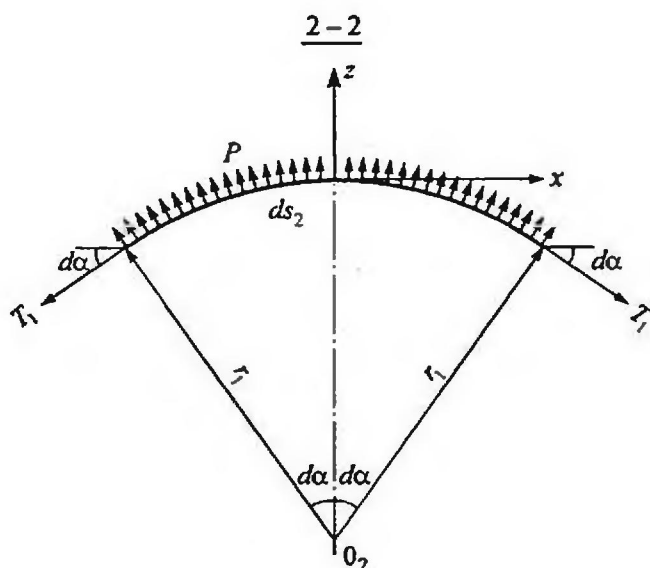
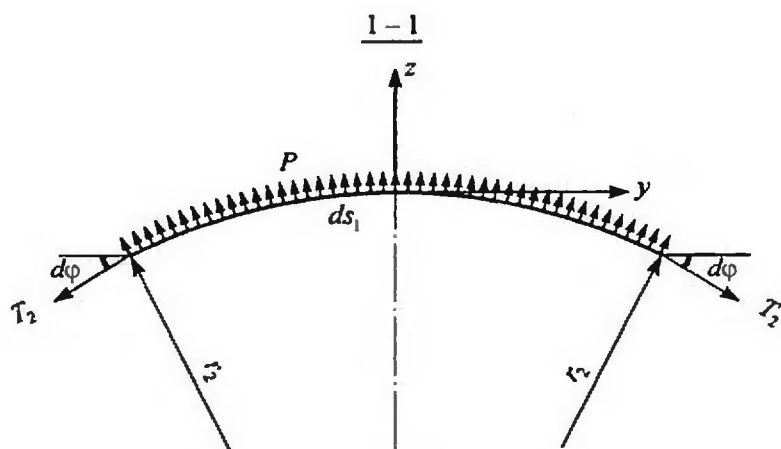


Рис. 2.2. Сечение элемента оболочки

В местах сопряжения и опирания оболочек имеет место наличие значительных местных изгибающих моментов.

2.2. РАСЧЕТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Листовые конструкции рассматриваемых типов резервуаров и газгольдеров представляют собой тонкостенные цилиндрические или конические оболочки вращения, способные терять устойчивость под воздействием сжимающих напряжений.

Для цилиндрических оболочек вращения, равномерно сжатых вдоль образующих, потеря устойчивости стенки происходит в меридиональном направлении. При этом проверку устойчивости выполняют по формуле

$$\sigma_1 \leq \sigma_{cr1} \cdot \gamma_c, \quad (2.5)$$

где σ_1 – расчетное меридиональное напряжение в поперечном сечении оболочки от нагрузок, направленных вдоль оси оболочки (например, для вертикального цилиндрического резервуара с постоянной крышей: собственный вес крыши, утеплителя на ней, снеговая нагрузка, возможный вакуум, собственный вес части стенки, расположенной выше рассматриваемого уровня);

σ_{cr1} – критическое нормальное напряжение, равное меньшему из значений

$$\psi \cdot R_y \quad \text{или} \quad \frac{c \cdot E \cdot t_w}{r}, \quad (2.6)$$

где коэффициент ψ при $0 < r/t_w \leq 300$ определяется по формуле

$$\psi = 0,97 - \left(0,00025 + 0,95 \cdot \frac{R_y}{E} \right) \cdot \frac{r}{t_w}, \quad (2.7)$$

r – радиус оболочки (стенки);

t_w – толщина оболочки (стенки);

значение коэффициента « c » принимают по табл. 2.2.

Таблица 2.2

Значения коэффициента c

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

Проверка на устойчивость замкнутой круговой цилиндрической оболочки вращения при действии только внешнего равномерного давления P , нормального к боковой поверхности, следует выполнять согласно [28] по формуле

$$\sigma_2 \leq \sigma_{cr2} \cdot \gamma_c, \quad (2.8)$$

где $\sigma_2 = P \cdot r/t_w$ – расчетное кольцевое напряжение в оболочке;

σ_{cr2} – критическое кольцевое напряжение, определяемое по формулам:

– при $0,5 \leq l/r \leq 10$

$$\sigma_{cr2} = 0,55 \cdot E \cdot \left(\frac{r}{l} \right) \cdot \left(\frac{t_w}{r} \right)^{3/2}; \quad (2.9)$$

– при $l/r \geq 20$

$$\sigma_{cr2} = 0,17 \cdot E \cdot \left(\frac{t_w}{r} \right)^2; \quad (2.10)$$

– при $10 < l/r < 20$ напряжение σ_{cr2} следует определять линейной интерполяцией;

l – длина оболочки (высота резервуара).

Для резервуаров и газгольдеров, как правило, применяется формула (2.9). Следует заметить, что формулу (2.9) применяют только для оболочек постоянной толщины. Кольцевые критические напряжения для цилиндрических оболочек с переменной толщиной стенки необходимо определять в соответствии с [24] по формуле

$$\sigma_{cr2} = 0,55 \cdot E \cdot \left(\frac{r}{l_r} \right) \cdot \left(\frac{t_{\min}}{r} \right)^{3/2}, \quad (2.11)$$

где $l_r = H_r$ – редуцированная высота вертикального резервуара, вычисляемая по формуле

$$H_r = \sum_i h_i \cdot \left(\frac{t_{\min}}{t_i} \right)^{5/2}; \quad (2.12)$$

h_i, t_i – соответственно высота и расчетная толщина листа i -го пояса;
 $t_{\min}$ – минимальная расчетная толщина оболочки.

Проверка на устойчивость замкнутой круговой цилиндрической оболочки вращения, подверженной одновременному действию сжимающих нагрузок вдоль оси и в радиальном направлении оболочки, выполняется по формуле

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \leq \gamma_c, \quad (2.13)$$

где σ_{cr1} определяется по формуле (2.6);

σ_{cr2} определяется по формулам (2.9) или (2.11).

Проверка на устойчивость конической оболочки (рис. 2.3) при действии внешнего равномерного давления P , нормального к боковой поверхности производится по формуле

$$\sigma_2 \leq \sigma_{cr2} \cdot \gamma_c, \quad (2.14)$$

где $\sigma_2 = P \cdot r_m / t$ – расчетное кольцевое напряжение в оболочке;

$$\sigma_{cr2} = 0,55 \cdot E \cdot \left(\frac{r_m}{h} \right) \cdot \left(\frac{t}{r_m} \right)^{3/2}, \quad (2.15)$$

где r_m – радиус, определяемый по формуле

$$r_m = \frac{0,9 \cdot r_2 + 0,1 \cdot r_1}{\cos \beta},$$

r_1, r_2, h, β – см. рис. 2.3.

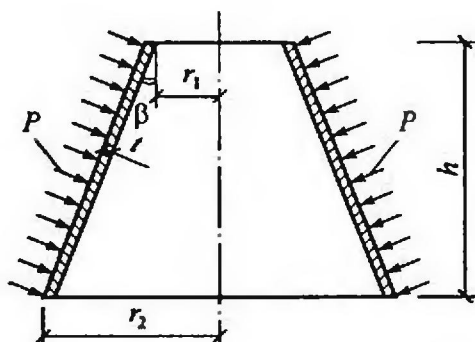


Рис. 2.3. Схема конической оболочки вращения

2.3. КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ В МЕСТЕ СОПРЯЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КРУГОВЫХ ОБОЛОЧЕК С ПЛОСКИМИ ДНИЩАМИ

Безмоментное напряженное состояние тонкостенных оболочек наблюдается в зонах, удаленных от мест сосредоточенного изменения геометрических и статических параметров оболочки, а также от мест резкого изменения силовых воздействий. На участках, называемых местами краевого эффекта, кроме усилий, напряжений и деформаций, определяемых по безмоментной теории, возникают еще дополнительные краевые усилия (моменты, поперечные силы), напряжения и деформации, называемые краевым эффектом.

Существует несколько причин возникновения краевых эффектов. Здесь рассматривается на примере узла сопряжения цилиндрической оболочки с плоским дном одна причина – стесненность свободы деформаций оболочки, отвечающих мембранным напряжениям. При этом возможны три варианта воздействий на плоское дно оболочки (стенки резервуара):

- а) дно располагается на упругом винклеровском основании (коэффициент постели $K = 0,05 \dots 0,20 \text{ кН/см}^3$);
- б) дно опирается на жесткое основание в виде железобетонных сборных или монолитных плит ($K > 0,5 \text{ кН/см}^3$);
- в) дно свободно от воздействий со стороны основания (днища горизонтальных цилиндрических резервуаров).

а) Расчет сопряжения стенки вертикального резервуара с дном на упругом песчано-грунтовом основании

Определение внутренних усилий в зоне краевого эффекта (в месте сопряжения стенки с дном) изложено в литературных источниках по единой методике [1, 13, 20 и др.], в основу которой положена основная система метода сил с двумя неизвестными. При этом разные авторы по-своему интерпретировали направления перемещений при определении коэффициентов и свободных членов канонических уравнений, что привело к написанию формул для коэффициентов и свободных членов с различными знаками. В работе [29] рассмотрена данная задача методом перемещений с одним неизвестным при некоторых допущениях.

Предлагается к рассмотрению основная система метода сил тоже с одним неизвестным M_0 без допущений (рис. 2.4) в рамках поставленной задачи.

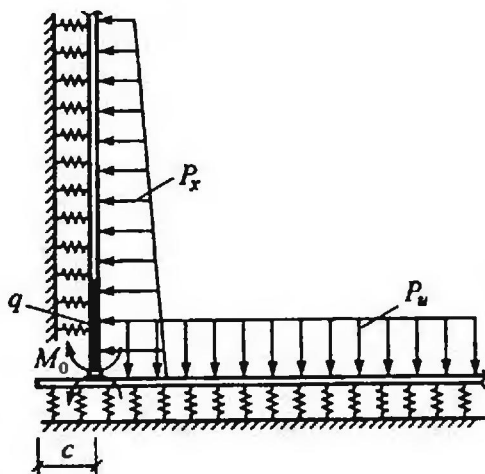


Рис. 2.4. Основная система сопряжения стенки резервуара с дном

$$(\delta_{11}^{cm} + \delta_{11}^{\partial n}) \cdot M_0 + (\Delta_{1p}^{cm} + \Delta_{1p}^{\partial n}) = 0. \quad (2.16)$$

Для решения дифференциального уравнения изогнутой оси балки на упругом основании использованы балочные функции А. Н. Крылова и метод начальных параметров.

Коэффициенты канонического уравнения определяются по формулам

$$\begin{aligned} \delta_{11}^{cm} &= \frac{2 \cdot \beta_{cm}^3}{K_{cm}}; \\ \delta_{11}^{\partial n} &= \frac{4 \cdot \beta_{\partial n}^3 \cdot [Y_1(\beta_{\partial n} \cdot c) + 2 \cdot Y_4(\beta_{\partial n} \cdot c)]}{K^{\partial n}}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

свободные члены по формулам

$$\begin{aligned} \Delta_{1p}^{cm} &= -\frac{P_u \cdot \beta_{cm} - P'}{K_{cm}}; \\ \Delta_{1p}^{\partial n} &= -\frac{2 \cdot \beta_{\partial n}}{K^{\partial n}} (q \cdot \beta_{\partial n} \cdot Z_1 - 2 \cdot P_u \cdot Z_2), \end{aligned} \quad (2.18)$$

где $\beta_{cm} = 4 \sqrt{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{r^2 \cdot t_1^2}}; K_{cm} = \frac{E \cdot t_1}{r^2}; \beta_{\partial n} = 4 \sqrt{\frac{3 \cdot K^{\partial n} \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot t_{окр}^3}},$

r – радиус резервуара;

t_1 – толщина нижнего листа стенки;

$t_{окр}$ – толщина окрайки днища;

$P_u = \gamma_{f_1} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot H_1 + \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}''; P' = (P_u - P_{изб})/H;$

H_1 – высота налива жидкости;

$\gamma_{f_1} = 1,1; \gamma_{f_2} = 1,2;$

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости;

$P_{изб}$ – избыточное давление в паровоздушном пространстве;

$Z_1 = Y_1(\beta_{\partial n} \cdot c) + 4 \cdot Y_4(\beta_{\partial n} \cdot c);$

$Z_2 = 16 \cdot Y_4(\beta_{\partial n} \cdot c) \cdot Y_3(\beta_{\partial n} \cdot r) \cdot Y_4(\beta_{\partial n} \cdot r) +$
 $+ 4 \cdot Y_1(\beta_{\partial n} \cdot c) \cdot Y_2(\beta_{\partial n} \cdot r) \cdot Y_4(\beta_{\partial n} \cdot r) - Y_4(\beta_{\partial n} \cdot c);$

$Y_1(\beta_{\partial n} \cdot c) = ch(\beta_{\partial n} \cdot c) \cdot \cos(\beta_{\partial n} \cdot c);$

$Y_2(\beta_{\partial n} \cdot r) \cdot Y_4(\beta_{\partial n} \cdot r) = -\frac{1}{8} \cos(2 \cdot \beta_{\partial n} \cdot r);$

$Y_3(\beta_{\partial n} \cdot r) \cdot Y_4(\beta_{\partial n} \cdot r) = \frac{1}{8} \sin(\beta_{\partial n} \cdot r) [\sin(\beta_{\partial n} \cdot r) - \cos(\beta_{\partial n} \cdot r)];$

$Y_4(\beta_{\partial n} \cdot c) = \frac{1}{4} [ch(\beta_{\partial n} \cdot c) \cdot \sin(\beta_{\partial n} \cdot c) - sh(\beta_{\partial n} \cdot c) \cdot \cos(\beta_{\partial n} \cdot c)];$

$K^{\partial n}$ – коэффициент постели основания;

$K^{\partial n} = 0,05 \dots 0,20 \text{ кН/см}^3$ – для песчаного основания;

$K^{\partial n} = 0,5 \dots 1,5 \text{ кН/см}^3$ – для железобетонного фундамента;

q – нагрузка на единицу длины дуги стенки от собственного веса стенки, покрытия и снега на нем.

Результаты вычислений показывают, что величины $Y_1(\beta_{\partial n} \cdot c)$ и Z_1 близки к единице (погрешность не превышает 5%).

Тогда получим

$$Z_2 = -\frac{1}{2} \cdot \cos(2\beta_{\partial n} \cdot r); \quad \delta_{11}^{\partial n} = \frac{4 \cdot \beta_{\partial n}^3}{K^{\partial n}};$$

$$\Delta_{1p}^{\partial n} = -\frac{2 \cdot \beta_{\partial n}}{K^{\partial n}} \cdot [q \cdot \beta_{\partial n} + P_u \cdot \cos(2\beta_{\partial n} \cdot r)].$$

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что величина M_0 , определяемая из уравнения (2.16), существенно зависит от $\Delta_{1p}^{\partial n}$. Величина $K^{\partial n}$ в реальных условиях определяется приближенно. Следовательно и значения коэффициента $\beta_{\partial n}(K^{\partial n})$ также приближенны. При весьма малых изменениях величины $K^{\partial n}$ произведение $2\beta_{\partial n} \cdot r$, которое является аргументом косинуса, меняется существенно (в радианах). Поэтому при вычислении наибольшего значения $\Delta_{1p}^{\partial n}$ следует принять $\cos(2\beta_{\partial n} \cdot r) = -1$. Принимая $M_0 = \frac{1}{6} \cdot t_{окр}^2 \cdot \gamma_c \cdot R_y$, уравнение (2.16) приводится к виду:

$$\begin{aligned} \beta_{\partial n}^3 - \beta_{\partial n}^2 \cdot \frac{3 \cdot q}{t_{окр}^2 \cdot \gamma_c \cdot R_y} - \beta_{\partial n} \cdot \frac{3 \cdot P_u}{t_{окр}^2 \cdot \gamma_c \cdot R_y} = \\ = \frac{1}{4} \cdot \frac{K^{\partial n}}{K^{cm}} \cdot \left[\frac{6 \cdot (P_u \cdot \beta_{cm} - P')}{t_{окр}^2 \cdot \gamma_c \cdot R_y} - 2 \cdot \beta_{cm}^3 \right], \end{aligned} \quad (2.19)$$

из которого определяется толщина окрайки $t_{окр}$ при заданном значении R_y .

Поперечная сила в этом месте определяется по формуле

$$Q_0 = -\beta_{cm} \cdot |M_0| + \frac{P_u}{\beta_{cm}}. \quad (2.20)$$

В справочнике [20] предлагается проверять на прочность окрайки днища с учетом развития шарнира пластичности по формуле

$$\sigma_{окр} = \frac{4 \cdot M_0}{t_{окр}^2} \leq \gamma_c \cdot \gamma_{кр} \cdot R_y, \quad (2.21)$$

где момент M_0 определяется из уравнения (2.16);

$\gamma_{кр} = 1,2$ – коэффициент условия работы стенки резервуара в зоне краевого эффекта.

Кольцевые сварные швы, прикрепляющие стенку к окрайкам днища (рис. 2.5), проверяются на прочность по металлу шва (или по металлу границы сплавления) по формуле (предварительно задавшись катетом шва K_f)

$$\tau_f = \frac{q}{2 \cdot \beta_f \cdot K_f} + \frac{M_0}{(t_1 + 0,5 \cdot K_f) \cdot \beta_f \cdot K_f} \leq \gamma_c \cdot \gamma_{wf} \cdot R_{wf}. \quad (2.22)$$

Для резервуаров с толщиной листов нижнего пояса стенки 20 мм и менее рекомендуется тавровое соединение без разделки кромок. Размер катета каждого углового шва должен быть не более 12 мм и не менее номинальной толщины окрайки.

Для резервуаров с толщиной нижнего пояса стенки более 20 мм должно применяться тавровое соединение с разделкой кромок (рис. 2.5).

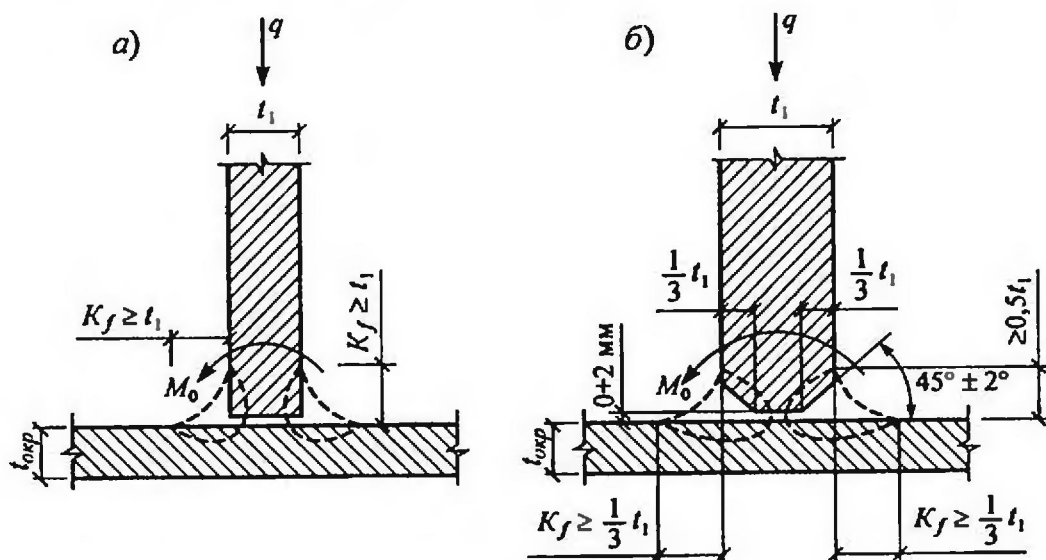


Рис. 2.5. Соединение стенки с дном:

а) при $t_1 \leq 20$ мм; б) при $t_1 > 20$ мм

При этом сварные швы должны выполняться как минимум в два прохода.

Поперечная сила Q_0 вызывает в сварных швах и стенке несущественные напряжения. Поэтому можно их не учитывать.

Следует заметить, что предлагаемая методика расчета сопряжения стенки резервуара с дном справедлива только при опирании резервуара на сплошное песчано-грунтовое основание, т.е. для резервуаров емкостью до 10 тыс. м³. Резервуары большей емкости (≥ 10 тыс. м³) размещают на кольцевом (бетонном или железобетонном) фундаменте или на сплошной железобетонной плите. Сочетание кольцевого бетонного фундамента с песчаным в средней части дна приводит к разным упругим основаниям. В этом случае нет методики расчета напряженного состояния на стыке бетонного и песчаного основания, которое и будет определять несущую способность дна. Предлагается конструктивно смягчать резкий переход жесткостей оснований и фундамента с помощью установки дополнительных железобетонных плит без каких-либо обоснований.

б) Определение изгибающего момента M_0 в зоне краевого эффекта при опирании резервуара на железобетонную плиту

При опирании днища резервуара на сплошную железобетонную плиту участки днища, расположенные в зоне краевого эффекта, под воздействием изгибающего момента M_0 могут оторваться от плиты. В этом случае винклерово основание здесь не работает, и можно использовать методику расчета узла сопряжения при опирании на бетонное кольцо, изложенную в [1]. Следуя этой методике, и, используя уравнение (2.16), можно получить уравнение для определения момента M_0 в виде

$$\delta_{11}^{cm} \cdot M_0 + \frac{1}{3D_{\partial n}} \sqrt{\frac{M_0^3}{P_u}} + \Delta_{1p}^{cm} = 0, \quad (2.23)$$

где δ_{11}^{cm} и Δ_{1p}^{cm} определяются по формулам (2.17) и (2.18);

$$D_{\partial n} = \frac{E \cdot t_{\text{окр}}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} - \text{цилиндрическая жесткость окрайки днища.}$$

Величина отрыва днища от плиты определяется по формуле

$$l = 2 \sqrt{\frac{M_0}{P_u}} \quad (2.24)$$

в) Определение изгибающего момента M_0 в зоне краевого эффекта узла сопряжения плоского днища со стенкой горизонтального цилиндрического резервуара

Для определения изгибающего момента в зоне краевого эффекта в результате действия гидростатического и избыточного давлений так же, как при расчете вертикального цилиндрического резервуара, можно рассматривать полоски единичной ширины, вырезанные из стенки и днища и жестко соединенные между собой в узле. Причем, полоска, вырезанная из стенки, рассматривается, как балка на упругом основании. А полоска днища, как элемент круглой тонкой пластинки. Для упрощения задачи нагрузку на днище принимают равномерно распределенной.

Основную систему метода сил можно получить путем введения шарниров в узлах соединения днища со стенкой (рис. 2.6).

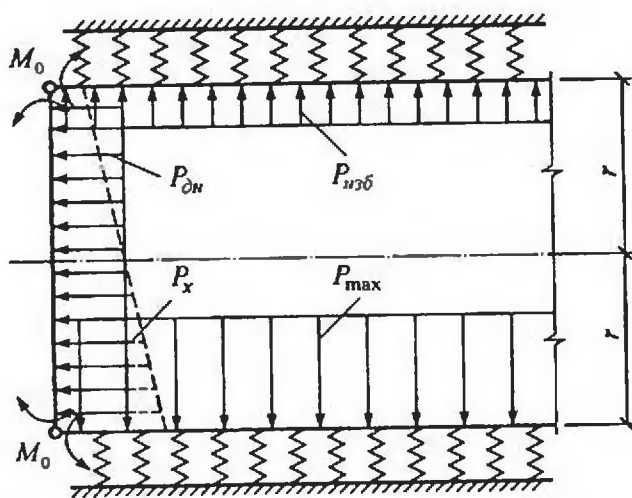


Рис. 2.6. Основная система сопряжения стенки с днищем

$$(\delta_{11}^{cm} + \delta_{11}^{\partial n}) \cdot M_0 + (\Delta_{1p}^{cm} + \Delta_{1p}^{\partial n}) = 0. \quad (2.25)$$

Перемещения полоски стенки (δ_{11}^{cm} и Δ_{1p}^{cm}), лежащей на упругом основании, определяются согласно расчетной схеме, изображенной на рис. 2.7.

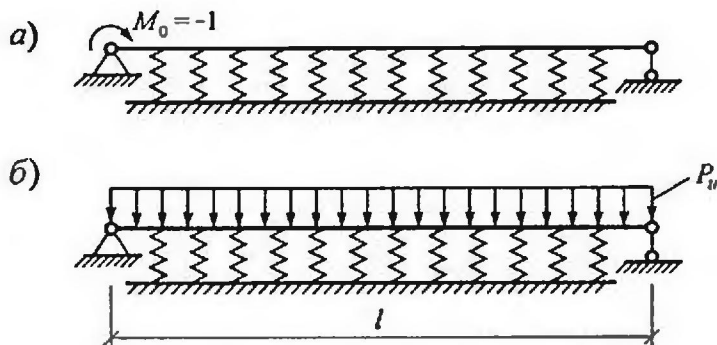


Рис. 2.7. К определению δ_{11}^{cm} и Δ_{1p}^{cm}

Для определения коэффициента δ_{11}^{cm} и свободного члена Δ_{1p}^{cm} уравнения (2.25) использованы балочные функции А. Н. Крылова и метод начальных параметров при расчете балок конечной длины на упругом основании [32]. В итоге для стенки получим

$$\delta_{11}^{cm} = \frac{2 \cdot \beta_{cm}^3}{K_{cm}}; \quad \Delta_{1p}^{cm} = -\frac{P_u \cdot \beta_{cm}}{K_{cm}}, \quad (2.26)$$

где $\beta_{cm} = 4 \sqrt{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{r^2 \cdot t_{cm}^2}}; \quad K_{cm} = \frac{E \cdot t_{cm}}{r^2}.$

При построении формул для определения коэффициента $\delta_{11}^{\partial n}$ и свободного члена $\Delta_{1p}^{\partial n}$ для полоски днища следует принимать другие расчетные схемы в зависимости от силовых воздействий (рис. 2.8).

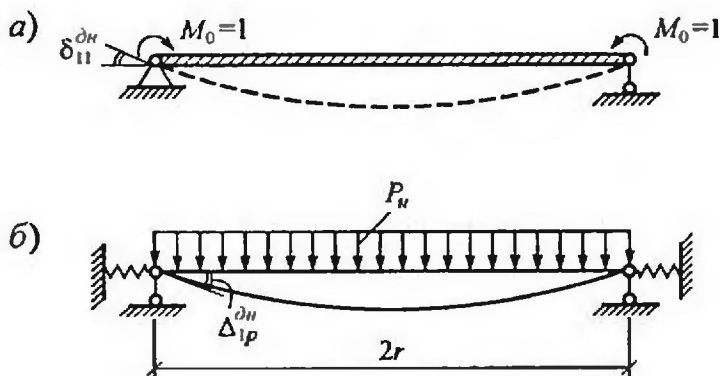


Рис. 2.8. К определению $\delta_{11}^{\partial n}$ и $\Delta_{1p}^{\partial n}$

Угол поворота опорных сечений от равномерно распределенных единичных моментов по контуру круглой пластинки, шарнирно опертой по краям, соответствует коэффициенту $\delta_{11}^{\partial n}$ (рис. 2.8 а), который можно определить по формуле, приведенной в справочнике [25], с небольшими преобразованиями

$$\delta_{11}^{\partial n} = 12 \cdot \frac{r \cdot (1-\nu)}{E \cdot t_{\partial n}^3}. \quad (2.27)$$

Для определения угла поворота опорных сечений от равномерно распределенной нагрузки днище ($\Delta_{1p}^{\partial n}$) представлено полой безмоментной оболочкой, в которую оно превращается при деформировании круглой мембраны, упруго закрепленной по контуру (рис. 2.8 б). Ординаты полой оболочки определяются по формуле [5]:

$$w = f_y \cdot a \cdot \left(\frac{1}{a} - 2 \cdot \frac{x^2}{r^2} + b \cdot \frac{x^4}{r^4} \right), \quad (2.28)$$

где f_y – прогиб центра днища, определяемый по формуле [20]:

$$f_y = \frac{D}{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P_u}{E} \left[\frac{(1-\nu) \cdot D}{2 \cdot t_{\partial n}} + \frac{D^2}{4 \cdot A_k} \cdot \left(1 + \frac{A_k \cdot y^2}{J_x} \right) \right]}, \quad (2.29)$$

D – диаметр резервуара;

y – ордината внешней поверхности уголка жесткости относительно центра днища;

A_k – сечение кольца жесткости в виде уголка;

J_x – момент инерции сечения кольца жесткости относительно центра днища;

ν – коэффициент Пуассона;

$$a = \frac{3+\nu}{5+\nu}; \quad b = \frac{1+\nu}{3+\nu};$$

x – переменный радиус днища с началом в центре.

$$\Delta_{1p}^{\partial n} = \frac{dw}{dx} \Big|_{x=r} = -\frac{8 \cdot f_y}{r \cdot (5+\nu)}. \quad (2.30)$$

Значение момента M_0 определяется из уравнения (2.25).

2.4. РАСЧЕТ ЛИСТОВЫХ ОБШИВОК

Кровлю покрытий рассчитывают как безмоментную оболочку без учета условий опирания. Незначительные нагрузки на нее (ветровая, избыточное давление, вакуум и др.) требуют малых толщин листов. Поэтому толщину листов кровли назначают из конструктивных соображений толщиной

4...5 мм (из условий коррозии и возможности крепления с помощью сварки). При этом не учитывают местные изгибающие моменты в опорных сечениях кровли.

Рулонные заготовки кровли опираются на радиальные ребра и систему колец жесткости, как неразрезные тонкие пластинки. Поэтому расчетной схемой рассматриваемых конструкций является неразрезная изгибно-жесткая нить (полоса единичной ширины) с равными пролетами (рис. 2.9).

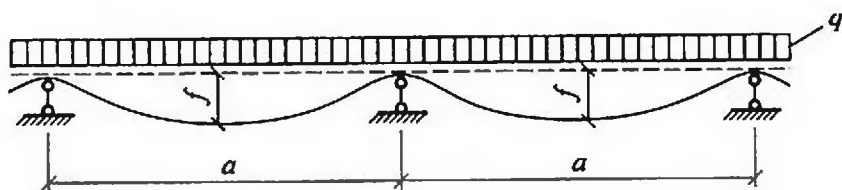


Рис. 2.9. Расчетная схема обшивки стенок и кровли покрытий

Приближенный расчет, приемлемый для инженерных расчетов изгибно-жестких нитей, изложен в книге [8]. Изгибно-жесткая нить испытывает под нагрузкой растяжение с изгибом. Причем над опорами могут возникать большие нормальные напряжения изгиба, значительно превышающие напряжения растяжения нити. Расчет изгибно-жестких нитей осложнен тем, что напряженное состояние их зависит от величины стрелки провеса f , которая неизвестна. Рассмотрим методику расчета изгибно-жесткой нити применительно к кровле покрытия.

Стрелкой провеса нити f_0 можно задаться на этапе монтажа покрытия, т.е. при действии только собственного веса на нить

$$f_0 \approx \frac{1}{100} a.$$

При последующем нагружении очертание нити останется почти таким же, каким оно было от собственного веса. Кривизна нити при этом будет меняться незначительно, следовательно, и изгибающие моменты в нити будут изменяться мало (в упругой области). Естественно, натяжение нити возрастает. Поэтому можно считать стрелку провеса нити при дополнительной нагрузке не меняющейся, т.е.

$$f_1 \approx f_0.$$

Величина опорного момента определяется по формуле

$$M_{on} \approx \frac{q \cdot a}{2 \cdot K}, \quad (2.31)$$

где a – шаг колец покрытия;

$$K = \sqrt{\frac{H}{E_1 \cdot J}};$$

H – распор нити, определяемый по формуле

$$H = \frac{q \cdot a^2}{8 \cdot f_0} - \frac{48 \cdot E_1 \cdot J}{a^2};$$

$$E_1 = \frac{E}{1 - \nu^2}; \quad J = \frac{1 \cdot t_n^3}{12},$$

t_n — толщина настила (кровли).

Прочность настила проверяется по формуле (задавшись толщиной настила t_n)

$$\sigma = \frac{H}{1 \cdot t_n} + \frac{6 \cdot M_{on}}{1 \cdot t_n^2} \leq \gamma_c \cdot R_y. \quad (2.32)$$

Оболочка стенок сухих газгольдеров и защитных стенок шайб также воспринимает незначительную нагрузку в виде избыточного давления. В отличие от кровли оболочка стенок, прикрепляемая к горизонтальным кольцам, на стадии монтажа в вертикальном направлении не будет иметь начальных прогибов в горизонтальной плоскости. Последующее избыточное давление газа вызовет незначительный прогиб вертикальной ленты единичной ширины между горизонтальными кольцами за счет растяжения ленты. В качестве расчетной схемы вертикальной полосы единичной ширины можно принять многопролетную изгибно-жесткую нить, начальное состояние которой характеризуется отсутствием прогиба и распора H_0 . В этом случае распор H можно определить как для гибкой нити по формуле

$$H = \sqrt[3]{\frac{D_1 \cdot E_1 \cdot A}{2 \cdot a}}, \quad (2.33)$$

где $D_1 = \frac{P_{изб}^2 \cdot a^3}{12}$ — характеристика нагрузки;

$A = 1 \cdot t_{об}$ — сечение полосы;

a — шаг горизонтальных колец.

Подставляя выражения для D_1 и A в формулу (2.33), получим

$$H = \sqrt[3]{\frac{P_{изб}^2 \cdot a^2 \cdot E_1 \cdot t_{об}}{24}}. \quad (2.34)$$

Прогиб полосы под нагрузкой вызовет опорный изгибающий момент

$$M_{on} \approx \frac{P_{изб} \cdot a}{2K}, \quad (2.35)$$

$$\text{где } K = \sqrt{\frac{12H}{E_1 \cdot t_{об}^3}}.$$

Прочность обшивки проверяется по формуле

$$\sigma = \frac{H}{1 \cdot t_{об}} + \frac{6 \cdot M_{on}}{1 \cdot t_{об}^2} \leq \gamma_c \cdot R_y. \quad (2.36)$$

2.5. ПОСТОЯННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ НАГРУЗКИ НА РЕЗЕРВУАРЫ И ГАЗГОЛЬДЕРЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

К постоянным нагрузкам относят нагрузки от собственных весов конструктивных элементов резервуаров и газгольдеров. На основании ранее выполненных проектов составлены таблицы (например, в Справочнике проектировщика. Металлические конструкции / Под ред. Н. П. Мельникова. – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с.), в которых приведены значения основных размеров и масс элементов резервуаров и некоторых типов газгольдеров в зависимости от их номинального объема. В табл. П1 указаны габаритные размеры, толщины стенок и единичные массы элементов вертикальных цилиндрических резервуаров со стационарным покрытием, а в табл. П2 приведены эти же показатели для резервуаров с плавающей крышей. В табл. П7 приведены аналогичные показатели горизонтальных резервуаров для нефтепродуктов.

Собственный вес подвижных частей мокрого газгольдера необходимо знать для определения величины пригруза.

Для мокрых газгольдеров в справочной литературе не приведены величины масс его элементов. Массы стенок колокола и телескопов можно приближенно определить по их геометрическим размерам типовых проектов. Сложнее обстоит дело с определением массы покрытия колокола. Однако покрытия колоколов и вертикальных цилиндрических резервуаров в большинстве случаев идентичны в конструктивном отношении. Поэтому представляется возможным определять массу покрытия колокола, как массу стационарного покрытия резервуара без центральной стойки.

Временные нагрузки на рассматриваемые типы сооружений:

- гидростатическое давление жидкости, характеризующее ее плотностью (табл. П3);
- избыточное давление в паровоздушной зоне;
- избыточное давление газа в газгольдере;
- вакуум при понижении температуры воздуха и при опорожнении емкостей;
- величина пригруза;
- временная полезная нагрузка на обслуживающие площадки до 2 кПа;
- снеговая и ветровая нагрузки в соответствии со СНиПом [26].

Остановимся подробнее на определении снеговых и ветровых нагрузок.

В соответствии с изменением №2 СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия» полное расчетное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия следует определять по формуле:

$$S = S_g \cdot \mu, \quad (2.37)$$

где S_g – расчетное значение веса снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности земли, принимаемое по табл. 2.3.

Расчетные удельные значения снеговой нагрузки

Снеговые районы Российской Федерации	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
S_g , кПа	0,8	1,2	1,8	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6

Нормативное значение снеговой нагрузки определяется умножением расчетного значения на коэффициент 0,7.

μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие. Для пологого сферического покрытия эпюра коэффициента μ изображена на рис. 2.10.

Значение коэффициента μ определяется по формуле

$$\mu = \cos(1,8\alpha). \quad (2.38)$$

Поскольку рассматривается пологий купол, $\cos(1,8\alpha)$ будет слабо меняться вдоль диаметра. Поэтому с целью упрощения расчета купола можно принять $\mu = 1,0$ по всему покрытию.

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки w_m на высоте z над поверхностью земли следует определять по формуле

$$w_m = w_0 \cdot k_0 \cdot c, \quad (2.39)$$

где w_0 – нормативное значение ветрового давления в зависимости от ветрового района (I район – $w_0 = 0,23$ кПа; II район – $w_0 = 0,30$ кПа; III район – $w_0 = 0,38$ кПа; IV район – $w_0 = 0,48$ кПа; V район – $w_0 = 0,60$ кПа; VI район – $w_0 = 0,73$ кПа; VII район – $w_0 = 0,85$ кПа);

k_0 – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте (табл. 2.4);

c – аэродинамический коэффициент, зависящий от формы сооружения, определяемый по приложению 4 СНиПа [26]. Для вертикального цилиндрического резервуара номер схемы 12, б приложения 4.

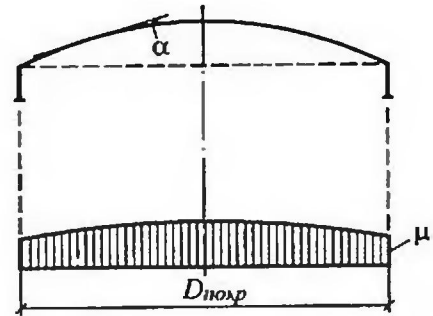
Рис. 2.10. Эпюра μ для пологого сферического куполаЗначения коэффициента k_0

Таблица 2.4

Высота z , м	Коэффициент k_0 для типов местности		
	A	B	C
≤ 5	0,75	0,50	0,40
10	1,0	0,65	0,40
20	1,25	0,85	0,55

Типы местности:

А – открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра;

В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м;

С – городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м.

В СНиПе [26] приведена методика определения аэродинамического коэффициента для сооружения типа вертикального цилиндрического резервуара со сферическим покрытием. Величина аэродинамического коэффициента (рис. 2.11) определяется по формуле

$$c_{e1} = \kappa_1 \cdot c_\beta, \quad (2.40)$$

где $\kappa_1 = 1$ при $c_\beta > 0$; κ_1 – по табл. приложения 4 [26] при $c_\beta < 0$.

Значения коэффициента c_β (рис. 2.11) принимаются по графику [26] при значениях чисел Рейнольдса $Re > 4 \cdot 10^5$. Для резервуаров даже малых объемов $Re > 4 \cdot 10^5$

$$Re = 0,88 \cdot d \cdot \sqrt{w_0 \cdot \kappa_0 \cdot \gamma_f} \cdot 10^5.$$

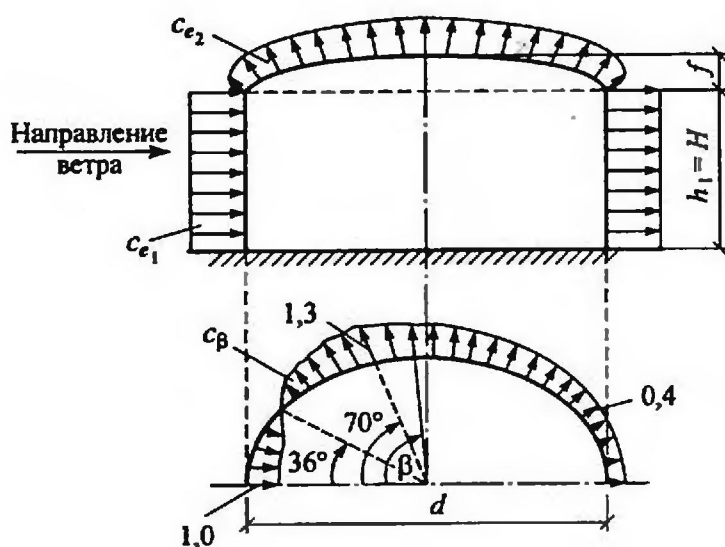


Рис. 2.11. Эпюры коэффициентов c_e и c_β

При $\beta = 0^\circ$ $c_\beta = 1,0$ и $c_{e1} = 1,0$. Нулевое значение c_β соответствует $\beta = 36^\circ$. Максимальное значение $c_{\beta, \max} = -1,3$ при $\beta = 70^\circ$. Примерно в интервале значений угла β от 130° до 180° (на половине кольца) $c_\beta = -0,4$. При $c_\beta < 0$ значения κ_1 определяются по таблице [26] в зависимости от отношения h_1/d . Для отношения $h_1/d = 0,4$ $\kappa_1 = 0,87$ и $c_{e1}(70^\circ) = -1,3 \cdot 0,87 = -1,13$. Величина c_{e1} при $\beta > 120^\circ$ $c_{e1} = -0,4 \cdot 0,87 = -0,35$. На рис. 2.12 изображена эпюра c_{e1} в горизонтальной плоскости.

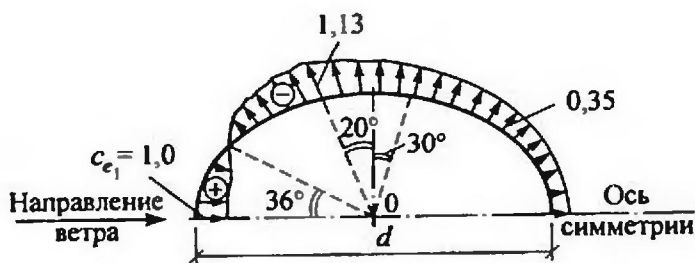


Рис. 2.12. Эпюра c_{e1} на корпусе резервуара в плане

Коэффициент c_{e2} определяется по схеме 12,6 на стр. 28 [26] в зависимости от отношения h_1/d .

Для расчета радиальных ребер покрытия резервуара на сжатие будем учитывать участок эпюры c_{e1} с положительными значениями, ограниченный углом $\alpha \approx 2 \cdot 40^\circ = 80^\circ$, а с противоположной стороны этим же углом с отрицательными значениями ($-0,35$). На рис. 2.13 изображена расчетная часть эпюры c_{e1} .

На рис. 2.13 разница коэффициента c_{e1} (см. рис. 2.12) принята для одного радиального ребра в направлении ветровой нагрузки.

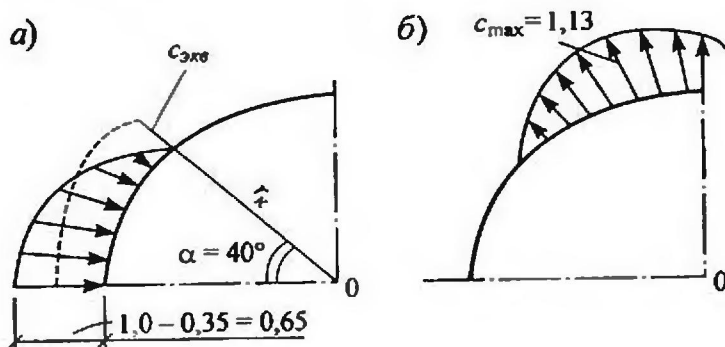


Рис. 2.13. К определению ветровой нагрузки на радиальное ребро покрытия:
а) эпюра c с плюсом; б) эпюра c с минусом

При $\alpha = 40^\circ$ $\sin \alpha = 0,643$. Заменяем истинную эпюру c_{e1} равномерно распределенной по дуге окружности эквивалентной по условной сосредоточенной силе N_c (по равенству площадей криволинейной эпюры и равномерно распределенной):

$$\frac{2}{3}(1,0 - 0,35) \cdot r_k \cdot \sin \alpha \approx r_k \cdot c_{экв} \cdot \sin \alpha.$$

Отсюда имеем $c_{экв} = 0,43$. Можно принять $c_{экв} = 0,5$.

Для расчета стенки резервуара на устойчивость принимают $c = 0,5$ по всей окружности, т.е. ветровую нагрузку заменяют условным вакуумом.

Значения коэффициентов надежности γ_f для нагрузок, соответствующих резервуарам и газгольдерам, приведены в табл. П5.

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАРЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

3.1. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ ПОД РЕЗЕРВУАРЫ

Днище укладывается на специальное основание, которое при $V \leq 5000 \text{ м}^3$, как правило, выполняется в виде песчаных подушек с устройством гидроизолирующего слоя (рис. 3.1). Для приготовления этого слоя применяются супесчаный грунт и вяжущее вещество, обычно жидкий битум или каменноугольный деготь в пределах 8...10% от объема грунта.

Для резервуаров вместимостью свыше 5000 м^3 помимо песчаной подушки устраивают кольцевой фундамент под корпус обычно из сборных железобетонных плит шириной 1,0...1,8 м и толщиной 0,3...0,5 м, а также в виде сплошной железобетонной плиты или свайных фундаментов с ростверком. Резервуары, предназначенные для этилированных бензинов, независимо от вместимости, под днищем должны иметь сплошную бетонную или железобетонную плиту с уклоном от центра к периметру.

Для обеспечения длительной эксплуатации резервуаров стальные конструкции должны быть защищены от коррозии путем тщательной очистки поверхностей после гидравлического испытания пескоструйной обработкой, огрунтовкой и окрашиванием. Для грунтов используются битумные и асфальтобитумные лаки, а также составы на основе фенолформальдегидных смол. В качестве окрасок применяются составы, приготовленные на битумных и асфальтобитумных лаках, а также эффективные перхлорвиниловые эмали. Все наружные поверхности должны иметь светлый или серебристый цвет для хорошего отражения солнечных лучей.

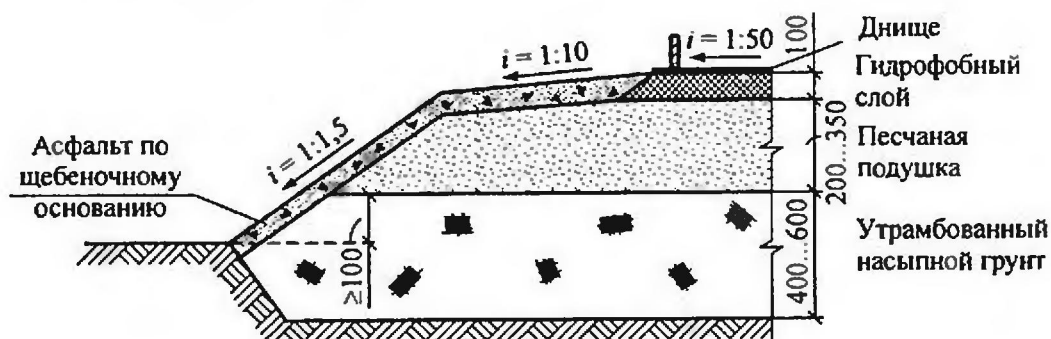


Рис. 3.1. Основание под резервуар

3.2. КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДНИЩ РЕЗЕРВУАРОВ

Днища резервуаров состоят из двух частей: центральной и периферийной (окраек). Они могут быть плоскими или коническими с уклоном от центра или к центру (1 : 100). Центральная часть днища испытывает незна-

чительные напряжения от давления жидкости. Поэтому ее не рассчитывают и толщину листов принимают по конструктивным соображениям с учетом удобства выполнения сварных соединений и сопротивляемости коррозии (из стали марки ВСтЗсп5 независимо от объема).

В работе [2] отмечается, что язвенная коррозия в листах днища вызывает наступление предельного состояния вследствие потери герметичности резервуара при образовании сквозного свища. Припуск на коррозию 1–2 мм существенно повышает долговечность резервуара. Вместо применяемых в типовых проектах для днищ листов толщиной 4 и 5 мм рекомендуется использовать листы толщиной 6 мм.

Центральная часть днища состоит из четного числа рулонизируемых полотнищ шириной до 12 м. Полотнища собирают из листов 1500×6000 мм. Соединяются полотнища между собой внахлестку (размер нахлестки 50...60 мм).

Днища резервуаров объемом 1000 м^3 и менее выполняют из листов постоянной толщины. Для резервуаров объемом 2000 м^3 и более днища должны иметь центральную часть и утолщенные кольцевые окрайки (рис. 3.2).

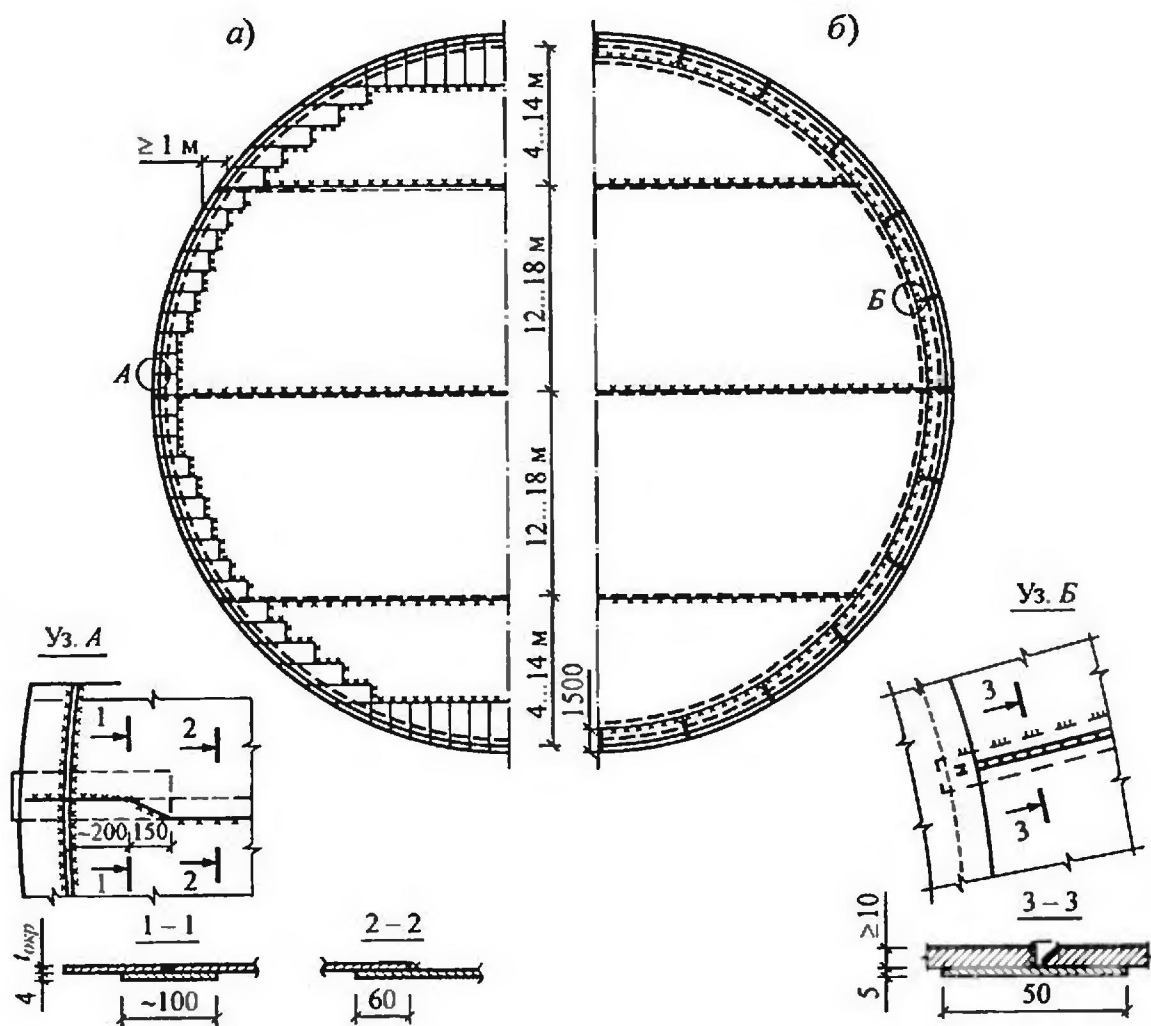


Рис. 3.2. Днища вертикальных резервуаров:
а) с обычными окрайками; б) с сегментными окрайками

Толщина листов центральной части днища и окраек должна быть не менее величин, приведенных в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Минимальные значения толщин листов днищ

Толщина нижнего пояса стенки резервуара, мм	Минимальная толщина листов средней части днища, мм	Минимальная толщина листов окраек, мм
до 7 вкл.	6	6
8...11 вкл.	6	7
12...16 вкл.	6	9
17...20 вкл.	6	12
21...26 вкл.	6	14
свыше 26	6	16

Для резервуаров объемом от 2 до 10 тыс. м³ применяются днища с обычными окрайками; вместимостью более 10 тыс. м³ – с отдельными сегментными окрайками (рис. 3.2). Сегментные окрайки отгружаются на монтажную площадку в виде отдельных обрезанных по трем краям листов шириной 1500...2000 мм и привязываются к рулонизируемой части днища внахлестку сверху. Соединения сегментных окраек между собой выполняются стыковыми швами на остающейся подкладке.

Последовательность наложения монтажных швов днища следующая:

- 1) сваривают полотнища днища между собой внахлестку;
- 2) сваривают листы окраек, образуя кольцо;
- 3) устанавливают корпус резервуара на окрайки и приваривают его двумя кольцевыми швами к окрайкам;
- 4) сваривают окрайки кольцевым швом с центральной частью днища.

Полный диаметр днища на 100...120 мм больше наружного диаметра резервуара.

Окрайки днища должны проверяться на прочность от воздействия изгибающего момента краевого эффекта M_0 (см. п. 2.3).

3.2.1. Пример расчета окраек вертикального цилиндрического резервуара объемом 5000 м³

Исходные данные. Тип резервуара – со стационарной крышей. Жидкость – нефть. Избыточное давление – $P_{изб}^H = 2$ кПа. Высота стенки резервуара – $H = 11,92$ м. Диаметр – $D = 22,8$ м. Толщина нижнего пояса стенки – $t_1 = 9$ мм. Толщина листов окрайки – $t_{окр} = 7$ мм. Коэффициент постели основания (песчаная подушка) – $K_{\text{пн}} = 0,1$ кН/см³. Материал конструкций – сталь С255 ($R_y = 24$ кН/см²). Место строительства – Москва.

Требуется проверить на прочность листы окраек в зоне краевого эффекта.

Изгибающий момент M_0 в зоне краевого эффекта определяется из уравнения (2.16).

Определение параметров для коэффициентов канонического уравнения по формулам (2.17) и (2.18).

Коэффициенты деформации:

– стенки

$$\beta_{cm} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{r^2 \cdot t_{p,1}^2}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - 0,3^2)}{1140^2 \cdot 0,85^2}} = 0,041 \frac{1}{\text{см}},$$

где $\nu = 0,3$ – коэффициент Пуассона;

$$t_{p,1} = 9,0 - 0,5 = 8,5 \text{ мм},$$

0,5 мм – припуск на минусовый допуск листовой стали и коррозию;

– днища

$$\beta_{\partial n} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot K_{\partial n} \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot t_{p,окр}^2}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 0,1 \cdot (1 - 0,3^2)}{2,06 \cdot 10^4 \cdot 0,65^2}} = 0,075 \frac{1}{\text{см}},$$

где $t_{p,окр} = 7,0 - 0,5 = 6,5 \text{ мм}$.

Условный коэффициент постели стенки

$$K_{cm} = \frac{E \cdot t_{p,1}}{r^2} = \frac{2,06 \cdot 10^4 \cdot 0,85}{1140^2} = 0,0135 \text{ кН/см}^3.$$

Давление на днище

$$P_u = 1,1 \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot H_1 + 1,2 \cdot P_{изб}'' = \\ = 1,1 \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} \cdot (11,92 - 0,3) \cdot 10^2 + 1,2 \cdot 2,0 \cdot 10^{-4} = 0,01153 \text{ кН/см}^2;$$

$$P' = \frac{P_u - P_{изб}}{H_1} = \frac{0,01153 - 0,00024}{(11,92 - 0,3) \cdot 10^2} = 9,72 \cdot 10^{-6} \text{ кН/см}^3.$$

Коэффициенты канонического уравнения (2.16)

$$\delta_{11}^{cm} = \frac{2 \cdot \beta_{cm}^3}{K_{cm}} = \frac{2 \cdot 0,041^3}{0,0135} = 0,0102 \frac{1}{\text{кН}};$$

$$\delta_{11}^{\partial n} = \frac{4 \cdot \beta_{\partial n}^3}{K_{\partial n}} = \frac{4 \cdot 0,075^3}{0,1} = 0,017 \frac{1}{\text{кН}}.$$

Свободные члены (2.16)

$$\Delta_{1p}^{cm} = -\frac{P_u \cdot \beta_{cm} - P'}{K_{cm}} = -\frac{0,01153 \cdot 0,041 - 0,97 \cdot 10^{-5}}{0,0135} = -0,0343;$$

$$\Delta_{1p}^{\partial n} = -\frac{2 \cdot \beta_{\partial n}}{K_{\partial n}} (q \cdot \beta_{\partial n} - P_u),$$

где q – нагрузка на единицу длины дуги стенки от собственного веса стенки, покрытия и снега на нем, т.е.

$$q = q_{cm} + q_{пк} + q_{сн}.$$

Для определения собственного веса стенки и покрытия обратимся к табл. П1.

$$g_{cm} = 10,02 \text{ кг/м}^3; \quad g_{нк} = 4,17 \text{ кг/м}^3;$$

$$q_{cm} = \frac{g_{cm} \cdot V}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{10,02 \cdot 5000}{2 \cdot 3,14 \cdot 1140} = 7,0 \text{ кг/см} = 7,0 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ кН/см} = 0,069 \text{ кН/см};$$

$$q_{нк} = \frac{g_{нк} \cdot V \cdot g \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{4,17 \cdot 5000 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1140} = 0,0286 \text{ кН/см};$$

$$q_{сн} = \frac{S_g \cdot \mu \cdot r}{2} = \frac{1,8 \cdot 1,0 \cdot 11,4}{2} = 10,26 \text{ кН/м} = 0,103 \text{ кН/см},$$

где $S_g = 1,8 \text{ кПа}$ (см. табл. 2.3), $\mu = 1,0$.

$$q = 0,069 + 0,0286 + 0,103 = 0,2 \text{ кН/см}.$$

$$\Delta_{1p}^{\partial n} = -\frac{2 \cdot 0,075}{0,1} (0,2 \cdot 0,075 - 0,01153) = -0,0052.$$

Полученные значения подставим в уравнение (2.16)

$$(0,0102 + 0,017) \cdot M_0 + (-0,0343 - 0,0052) = 0.$$

$$\text{Отсюда } M_0 = 1,45 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

Проверяем на прочность окрайку по формуле (2.21)

$$\begin{aligned} \sigma_{окр} &= \frac{4 \cdot M_0}{t_{p,окр}^2} = \frac{4 \cdot 1,45}{(0,7 - 0,05)^2} = 13,73 \text{ кН/см}^2 \\ &< \gamma_{кр} \cdot R_y = 1,2 \cdot 24,0 = 28,8 \text{ кН/см}^2 - \end{aligned}$$

прочность окراек обеспечена. Уменьшать толщину окраек нельзя, так как она принята минимально допустимой для данного объема резервуара.

3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ РЕЗЕРВУАРА

Габаритными размерами вертикального цилиндрического резервуара являются высота H и диаметр D . Для заданного объема резервуара (V) расход металла на днище, покрытие и стенку зависит, в основном, от соотношения габаритных размеров. Существует оптимальная высота резервуара $H_{онм}$, при которой расход металла будет минимальным.

Для резервуаров со стационарной крышей оптимальная высота приближенно может быть определена по формулам В. Г. Шухова:

– при постоянной толщине стенки

$$H_{онм} = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi} \cdot \left(\frac{\Delta}{t_w} \right)^2}; \quad (3.1)$$

– при переменной толщине стенки

$$H_{opt} = \sqrt{\frac{\gamma_c \cdot R_{wy} \cdot \Delta}{\gamma_{ж} \cdot \rho_{ж}}}, \quad (3.2)$$

где $\gamma_c = 0,8$; $\gamma_{ж} = 1,1$;

Δ – сумма приведенных толщин днища и покрытия, определяемая по табл. 3.2 [18] в зависимости от объема резервуара.

Таблица 3.2

Значения величин Δ

$V, \text{ м}^3$	2000	4000	8000	12000	16000	20000
$\Delta, \text{ см}$	0,9	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8

Следует заметить, что при выводе формул (3.1) и (3.2) величина Δ принимается постоянной для заданного объема V .

Анализ показывает, что формулы В. Г. Шухова применимы, в основном, для резервуаров объемом до 5000 м^3 , изготовленных из одной марки стали.

Для резервуаров больших объемов, и тем более из разных марок сталей, оптимальная высота определяется только с помощью ЭВМ.

В ЦНИИПСК за «оптимальную» принята высота 18 м, исходя из возможности рулонирования на механизированных станах.

При необходимости более точно оптимальную высоту резервуара можно определить по формуле (4), приведенную в работе [31]

$$H_{opt} = \sqrt[3]{\frac{\Delta^2 \cdot V}{\pi \left(2H \cdot \frac{dt}{dH} + t \right)^2}}, \quad (3.3)$$

если в этой формуле принять

$$t = t_{cp} = \frac{t_{\min} + t_{\max}}{2}, \quad (3.4)$$

где $t_{\min}$ – толщина верхнего пояса стенки;

$t_{\max}$ – соответственно нижнего пояса.

Пренебрегая избыточным давлением в резервуаре, толщина нижнего пояса стенки определяется по формуле

$$t_{\max} = \frac{\gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g}{\gamma_c \cdot R_{wy}} \sqrt{\frac{V \cdot H}{\pi}}. \quad (3.5)$$

Подставляя (3.4) и (3.5) в формулу (3.3), после преобразований получим уравнение (3.6), из которого методом попыток можно определить при конкретных исходных данных оптимальную высоту резервуара.

$$H_{onm}^4 - H_{onm}^3 \cdot a_1 - H_{onm}^2 \cdot 2 \cdot a_2 + a_2^2 = 0, \quad (3.6)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{\pi}{V} \left(\frac{\gamma_c \cdot R_{wy} \cdot t_{\min}}{2 \cdot \gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g} \right)^2; \quad a_2 = \frac{\Delta \cdot \gamma_c \cdot R_{wy}}{\gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g}.$$

Если в уравнении (3.6) пренебречь вторым слагаемым, то получим формулу (3.2), по которой результаты получаются несколько выше, чем из уравнения (3.6). Поэтому можно формулу (3.2) использовать для определения первого приближения уравнения (3.6).

Принятая высота H резервуара должна быть кратной стандартной ширине листовой стали за вычетом величины строжки кромок листов, равной примерно 5 мм. Как правило, стенка резервуара изготавливается из толстолистовой стали (размерами 1500×6000 мм, 2000×8000 мм).

Исходя из заданного объема и принятой высоты, определяют требуемый диаметр резервуара по формуле

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot H}}. \quad (3.7)$$

Длина развертки стенки резервуара $L = \pi \cdot D$, где $\pi = 3,14159$, которая изменяется до величины, кратной длине принятых листов или половине длины с учетом строжки кромок (5 мм). Фактический диаметр резервуара определяется по фактической длине развертки L_{ϕ} :

$$D_{\phi} = \frac{L_{\phi}}{3,14159}. \quad (3.8)$$

Таким образом, фактический объем резервуара будет несколько отличаться от заданного:

$$V_{\phi} = \frac{\pi D_{\phi}^2}{4} H. \quad (3.9)$$

На специализированных заводах листы для стенок и днищ свариваются стыковыми швами в полотнища, которые свертываются в рулоны. При разбивке стенки и днища резервуара на рулонизируемые полотнища следует учитывать условия их транспортировки по железной дороге. Полотнища на заводе наматывают либо на шахтные лестницы, либо на инвентарные каркасы диаметром примерно 2,5...2,8 м и массой 2,0...2,7 т. Полная масса рулона по условиям перевозки на железнодорожных платформах должна быть не более 62 т, а диаметр – не более 3,25 м. Таким образом, максимальная масса одного полотнища должна быть в пределах 58...60 т.

Днища резервуаров, диаметр которых превышает 18 м, расчленяют на четное число свариваемых полотнищ шириной 10...18 м.

Следует заметить, что листы из углеродистой стали обыкновенного качества можно рулонировать в полотнища при толщине до 16 мм включительно. При больших толщинах должна применяться полистовая сборка стенки.

3.4. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТЕНОК РЕЗЕРВУАРА

Стенки резервуаров вместимостью более 30000 м³ монтируют полистовым методом, а до 30000 м³ – методом рулонирования. Ширина рулона стенки 12 и 18 м из стандартных листов 1500×6000 мм (после строжки кромок 1490×5980 мм). Для резервуаров вместимостью 20000 м³ и более используются листы размером 2000×8000 мм (1990×7980 мм). Минимальная толщина листов – 4 мм, максимальная с учетом возможности разворачивания рулона без остаточных деформаций – 17 мм. Масса одного рулона не должна превышать 60 т; диаметр рулона – не более 3250 мм.

В типовых проектах резервуаров вместимостью до 5000 м³ принята унифицированная высота стенки, равная 12 м, а для резервуаров вместимостью 10000 м³ и более – 18 м. Все соединения между листами стенки выполняют встык. В резервуарах вместимостью до 1000 м³ толщина листов стенки постоянна по высоте корпуса.

Вертикальные соединения листов (с полным проплавлением по толщине) в прилегающих поясах стенки должны быть смещены друг относительно друга на расстояние не менее $8t$, где t – наибольшая из толщин листов прилегающих поясов. Для резервуаров II и III классов при изготовлении стенки из рулонных полотнищ допускаются вертикальные заводские и монтажные стыковые соединения без смещения. Расстояния между швами патрубков и швами стенки должны быть не менее: до вертикальных швов – 250 мм, до горизонтальных – 100 мм. Стыки окраек днища и вертикальные швы первого пояса стенки должны быть смещены ≥ 100 мм.

Стенку резервуара рассчитывают на прочность по безмоментной теории как цилиндрическую оболочку, работающую на растяжение в кольцевом направлении от действия гидростатического давления жидкости и избыточного давления газа в паровоздушном пространстве (под покрытием). Нормальные напряжения вдоль образующей стенки не учитывают потому, что они включают в себя нагрузки от собственного веса покрытия и части стенки, избыточного давления, снега и ветра, т.е. разных направлений. Кроме того, в этом случае имеем более двух временных нагрузок. Поэтому все временные нагрузки необходимо учитывать с коэффициентом сочетания $\psi = 0,9$.

Расчетное давление на глубине z от верхнего уровня жидкости

$$P_x = \gamma_{f_1} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot z + \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}^H, \quad (3.10)$$

где $\gamma_{f_1} = 1,1$; $\gamma_{f_2} = 1,2$ – коэффициенты надежности по нагрузке;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³ (по табл. ПЗ);

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \approx 10,0$;

$P_{изб}^H$ – нормативное значение избыточного давления, кН/м²;

z – расстояние от высшего уровня жидкости до нижней кромки пояса.

В соответствии с Правилами ПБ 03-381-00 [24] номинальные толщины стенок резервуара определяются в три этапа:

- предварительный выбор толщин поясов (из условия прочности и минимально конструктивно необходимых толщин в соответствии с табл. 3.3);
- корректировка толщин при проверочном расчете на прочность, включая и расчет на сейсмическое воздействие для сейсмоопасных районов (расчет на сейсмическое воздействие выполняется специализированной организацией);
- корректировка толщин при проведении расчета на устойчивость.

Таблица 3.3

Конструктивно необходимая толщина стенки

Диаметр резервуара D , м	Рулонное исполнение		Полистовое исполнение
	стационарная крыша	плавающая крыша	
$D < 16$	4	4	5
$16 \leq D < 25$	6	5	7
$25 \leq D < 35$	8	6	9
$D \geq 35$	10	8	10

Толщины стенок (и др. элементов) вертикального резервуара, определяемые прочностью и устойчивостью, гарантированы от наступления предельных состояний только в начальный период их эксплуатации. В процессе эксплуатации стальные резервуары подвергаются воздействию агрессивных сред. Коррозионные процессы развиваются особенно активно, если в резервуаре хранится нефть, содержащая сернистые соединения. Кроме того, двухосное напряженное состояние, которое наблюдается в листовых конструкциях, стимулирует коррозию в сравнении с одноосным напряженным состоянием. Действующие нормативные документы по расчету резервуаров учитывают воздействие агрессивной среды приближенно – путем задания коэффициента запаса на коррозию или в виде прибавки к расчетной толщине стенки. Эти способы учета воздействия коррозионно-активных сред на элементы резервуара применяются недостаточно обоснованно. Попытка достоверно оценить фактическое напряженно-деформированное состояние резервуаров в условиях воздействия на них внешних агрессивных сред сделана в учебном пособии [23]. В результате получена весьма громоздкая система разрешающих уравнений для резервуара. Причем для оценки прочности и устойчивости стенки резервуара после определенного срока эксплуатации необходимо знать фактические толщины листов стенки с учетом коррозионного износа. Поэтому для практических расчетов резервуаров с учетом коррозионного износа пока остается приближенный способ, указанный выше.

В резервуарах для хранения светлых нефтепродуктов повышенная равномерная коррозия (более 0,1 мм/год) отмечается в зоне переменного смачивания стенки; в средней части (по высоте) стенки (до 0,25 мм/год). В верхней части стенок и у днища скорость коррозии составляет примерно 0,1 мм/год.

В нефтяных и мазутных резервуарах скорость коррозии в листах верхних поясов стенки (наиболее высока) составляет 0,1 мм/год [2]. Поэтому для рассматриваемых емкостей можно принять скорость коррозии стенки 0,1...0,2 мм/год.

В работе [2] предлагается увеличивать толщину стенок резервуаров объемом 10000 и 20000 м³ в 3–7-х поясах - на 1 мм, в 8–12-х поясах - на 2 мм; в резервуарах объемом 700 и 1000 м³ толщину стенок в 1–2-х поясах - на 1–2 мм.

Согласно [24] номинальная толщина t каждого пояса стенки выбирается из сортаментного ряда таким образом, чтобы разность t и минусового допуска δ на прокат была бы не меньше максимума из трех величин:

$$\left. \begin{aligned} t - \delta &\geq \max(t_c + c) \\ t - \delta &\geq \max(t_g + c) \\ t - \delta &\geq \max(t_k + c) \end{aligned} \right\}, \quad (3.11)$$

где c – припуск на коррозию;

t_c – минимальная расчетная толщина стенки в каждом поясе для условий эксплуатации резервуара;

$$t_c = \frac{\gamma_n \cdot (1,1 \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot z_{жс} + P_{изб}) \cdot r}{R_y \cdot \gamma_c}, \quad (3.12)$$

$z_{жс}$ – расстояние от высшего уровня жидкости до нижней кромки пояса;

$\gamma_c = 0,7$ – для нижнего пояса;

$\gamma_c = 0,8$ – для всех остальных поясов;

t_g – минимальная расчетная толщина стенки в каждом поясе для условий гидравлических испытаний;

$$t_g = \frac{1,1 \cdot \rho_{сг} \cdot g \cdot z_{сг} \cdot r}{R_y \cdot \gamma_c}, \quad (3.13)$$

$\rho_{сг}$ – плотность воды при гидроиспытаниях;

$z_{сг}$ – расстояние от уровня налива воды до нижней кромки пояса;

$\gamma_c = 0,9$;

t_k – минимальная конструктивно необходимая толщина стенки, определяемая по табл. 3.3.

Проверка стенки на прочность производится по формуле

$$\sigma_2 \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}, \quad (3.14)$$

$$\text{где } \sigma_2 = \frac{(1,1 \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot z + 1,2 \cdot P_{узо}^H) \cdot r}{t_p},$$

$$t_p = t - \delta - c;$$

γ_n – коэффициент надежности по назначению, для резервуаров: $\gamma_n = 1,1$ – I-го класса; $\gamma_n = 1,05$ – II-го класса; $\gamma_n = 1,0$ – III-го класса.

Проверка стенки резервуара на устойчивость выполняется по формуле (2.13), где меридиональное напряжение σ_1 вычисляется для нижней кромки участка стенки постоянной толщины по формуле

$$\sigma_1 = \frac{1,05 \cdot G_m + 0,95 \cdot (1,05 \cdot G_o + 1,3 \cdot G_y)}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot t_p} + \frac{(0,9 \cdot S + 0,95 \cdot 1,2 \cdot P_{вак}^H) \cdot r}{2 \cdot t_p}, \quad (3.15)$$

где G_m – вес металлоконструкций выше расчетной точки (вес покрытия и части стенки);

G_o – вес стационарного оборудования;

G_y – вес утеплителя выше расчетной точки (если таковой предусмотрен).

Кольцевое напряжение σ_2 зависит от $P_{вак}$ и эквивалентного ветрового давления $P_{вет}$:

$$\sigma_2 = \frac{(0,95 \cdot 1,2 \cdot P_{вак}^H + 0,9 \cdot 0,5 \cdot P_{вет}) \cdot r}{t_{min}}, \quad (3.16)$$

где $P_{вет}$ – значение ветрового давления на уровне верха резервуара, определяемое по [26].

3.5. ОПТИМИЗАЦИЯ ТОЛЩИН ЛИСТОВ СТЕНКИ ПО ВЫСОТЕ РЕЗЕРВУАРА

В резервуарах объемом свыше 1000 м³ толщина стенки переменна по высоте. Причем толщина верхней части стенки определяется устойчивостью; остальная часть – прочностью. В работе [31] отмечается взаимозависимость толщин различных поясов стенки: чем больше толщина нижнего пояса t_{max} , подбираемая по прочности, тем тоньше верхний пояс стенки, рассчитываемый на устойчивость. Кроме того, устойчивость стенки определяется соответствующим набором толщин поясов по высоте. Устойчивость стенки обеспечивается различными вариантами наборов толщин ($\sum t_i$), которые определяют и разный расход стали на стенку. Значит, существует вариант набора толщин, при котором расход металла на стенку будет минимальным. Поэтому вопрос оптимального размещения толщин по высоте стенки является актуальным.

Очевидно, что некоторая верхняя часть стенки должна иметь постоянную толщину не менее конструктивно минимальной и обеспечивающей устойчивость стенки, т.е. чтобы выполнялось неравенство

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} > 1. \quad (3.17)$$

При этом толщина поясов нижележащего участка стенки по высоте ступенчато непрерывно меняется с учетом требований различных толщин листов при их сварке встык.

Формулу (2.13) можно привести к виду:

$$\frac{v^2}{E} \left[\frac{P_1}{2 \cdot c} + \frac{P_2 \cdot \sqrt{v}}{0,55 \cdot (r/H_r)} \right] = \gamma_c, \quad (3.18)$$

где $v = \frac{r}{t_{\min}}$;

$$P_1 = \bar{g}_{кр} + g_{cm} + g_{cn} + \psi \cdot (P_{вак} - P_w^{om}), \quad (3.19)$$

$$P_2 = \psi \cdot (P_w + P_{вак}), \quad (3.20)$$

$\bar{g}_{кр}$, $g_{cm} + g_{cn}$ – соответственно, удельные веса (на единицу площади днища) покрытия, выше лежащей части стенки и снега на покрытии;

$P_{вак}$ – вакуум;

P_w^{om} – ветровой отсос на покрытии;

P_w – ветровое давление на стенку;

ψ – коэффициент сочетания нагрузок.

Коэффициент «с» можно аппроксимировать формулой (в пределах значений $r/t = 800 \dots 2500$)

$$c = 1,092 \cdot 10^{-8} \cdot v^2 - 53,686 \cdot 10^{-6} \cdot v + 12,59 \cdot 10^{-2}. \quad (3.21)$$

Принимая минимальную толщину стенки равной конструктивно необходимой (по табл. 3.3) с соответствующими припусками

$$t_{\min} = t_{\kappa} + \delta + c,$$

по формуле (3.18) можно определить редуцированную высоту резервуара H_r по расчетной минимальной толщине, равной стандартной толщине листа за вычетом δ и c .

По высоте стенки существует сечение, в котором минимальная толщина $t_{\min}$ стенки будет удовлетворять одновременно условиям устойчивости (3.18) и прочности

$$t_{\min} = \frac{\gamma_n \cdot (\gamma_{жс} \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot H^* + P_{изб}) \cdot r}{\gamma_c \cdot R_{wy}}, \quad (3.22)$$

где $\gamma_n = 1,1$ – коэффициент надежности по назначению;

$\gamma_{жс} = 1,1$ – коэффициент надежности по нагрузке;

$\gamma_c = 0,8$ – коэффициент условия работы конструкции;

R_{wy} – расчетное сопротивление сварного стыкового шва;

H^* – расстояние от верхнего уровня налива жидкости до сечения стенки, в котором толщина $t_{\min}$ удовлетворяет одновременно условиям устойчивости и прочности. По формуле (3.22) определяется величина H^* .

Нижележащая часть стенки (при $H_i > H^*$ – от верха жидкости) имеет толщины, определяемые только прочностью, т.е. по формуле (3.22), заменяя H^* на H_i и получая t_{ip} – расчетные толщины стенки.

При расчетах на прочность и устойчивость стенки следует учитывать расчетную толщину поясов, которая определяется как разность номинальной толщины t , минусового допуска на прокат и припуска на коррозию.

Далее следует назначить номинальные толщины поясов стенки с учетом минусового допуска и припуска на коррозию, исходя из сортамента листовой стали, и вычислить фактическое значение редуцированной высоты стенки $H_{r,ф}$ по расчетным толщинам поясов, которое должно быть ниже теоретического значения H_r . Чем ближе $H_{r,ф}$ к H_r , тем меньше расход металла на стенку. Задача решается методом попыток; точнее и проще – на ЭВМ.

3.6. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДНИЩА И СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА ОБЪЕМОМ 30000 м³

Исходные данные. Тип резервуара – вертикальный цилиндрический со стационарной крышей. Жидкость – темные нефтепродукты, $\rho_{ж} = 0,9 \text{ т/м}^3$. Внутреннее избыточное давление $P_{изб}'' = 2 \text{ кПа} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$. Вакуум – $P_{вак}'' = 0,25 \text{ кПа}$. Район строительства: III – снеговой и II – ветровой. Резервуар относится к I классу опасности ($\gamma_n = 1,1$). Материал конструкций – спокойная сталь класса прочности С255 по ГОСТ 27772-88 без учета требований по ударной вязкости ($R_y = 24 \text{ кН/см}^2$ при $t = 10 \dots 20 \text{ мм}$; $R_y = 23 \text{ кН/см}^2$ при $t = 21 \dots 40 \text{ мм}$).

Определение габаритных размеров резервуара

Оптимальная высота стенки резервуара определяется из уравнения (3.6). В первом приближении оптимальную высоту резервуара можно определить по формуле (3.2), а затем уточнить по уравнению (3.6).

Принимая $R_{wy} = R_y = 24,0 \text{ кН/см}^2$, $\Delta = 2,0 \text{ см}$, $\gamma_c = 0,8$ и $\gamma_{ж} = 1,1$, по формуле (3.2) находим

$$H_{opt} = \sqrt{\frac{\gamma_c \cdot R_{wy} \cdot \Delta}{\gamma_{ж} \cdot \rho_{ж}}} = \sqrt{\frac{0,8 \cdot 24,0 \cdot 2,0}{1,1 \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6}}} = 1988 \text{ см.}$$

По табл. П1 диаметр резервуара (при $V = 30000 \text{ м}^3$) больше 35 м. Минимальная толщина стенки из конструктивных соображений (см. табл. 3.3) $t_{min} = 10 \text{ мм}$.

Найдем значения коэффициентов a_1 и a_2 уравнения (3.6).

$$a_1 = \frac{\pi}{V} \left(\frac{\gamma_c \cdot R_{wy} \cdot t_{min}}{2 \cdot \gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g} \right)^2 = \frac{3,14}{3 \cdot 10^{10}} \cdot \left(\frac{0,8 \cdot 24,0 \cdot 1,0}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6}} \right)^2 = 102,6 \text{ см} = 1,026 \text{ м};$$

$$a_2 = \frac{\Delta \cdot \gamma_c \cdot R_{wy}}{\gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g} = \frac{2,0 \cdot 0,8 \cdot 24,0}{1,1 \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6}} = 3,95 \cdot 10^6 \text{ см}^2 = 3,95 \cdot 10^2 \text{ м}^2.$$

Из уравнения (3.6) получим $H_{ont} = 17,9$ м. Высоту корпуса (стенки) следует принять равной $H = 18,0$ м.

Принимаем листы размером 1500×6000 мм (с учетом строжки 1490×5980 мм). Стенку komponуем из 12-ти поясов общей высотой $H = 12 \cdot 1,49 = 17,88$ м.

Требуемая длина развертки стенки

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot H_1}} = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{\frac{30000}{3,14 \cdot 17,58}} = 146,4 \text{ м},$$

где $H_1 = H - 0,3 = 17,88 - 0,3 = 17,58$ м – высота залива резервуара продуктом.

Монтаж стенки предполагается вести полистовым способом. Длину одного кольца стенки рекомендуется назначать кратной длине или половине длины листа. Количество листов в одном кольце

$$n_{\text{л}} = \frac{L}{l_{\text{л}}} = \frac{146,4}{5,98} = 24,45 \text{ шт.}$$

Примем $n_{\text{л}} = 24,5$ шт.

При этом фактическая длина развертки получится

$$L_{\phi} = 24,5 \cdot 5,98 = 146,51 \text{ м.}$$

Радиус оболочки корпуса

$$r = \frac{L_{\phi}}{2\pi} = \frac{146,51}{2 \cdot 3,1416} = 23,3 \text{ м.}$$

Фактический объем резервуара

$$V_{\phi} = \pi \cdot r^2 \cdot H_1 = 3,1416 \cdot 23,3^2 \cdot 17,58 = 29984 \text{ м}^3.$$

Расхождение с заданным объемом составляет

$$\frac{30000 - 29984}{30000} \cdot 100\% = 0,05\%, \text{ что является вполне допустимым.}$$

Определение толщин листов стенки

Вычисляем нагрузки от:

– крыши – по табл. П1 $g_{кр} \approx 5 \text{ кг/м}^3$ на 1 м^2 днища

$$\bar{g}_{кр} = g_{кр} \cdot H \cdot g \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 18 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 0,88 \text{ кН/м}^2 = 0,88 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2;$$

– снега

$$g_{сн} = S_g \cdot \mu = 1,8 \cdot 1,0 = 1,8 \text{ кПа} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2;$$

– избыточного давления

$$P_{изб} = \gamma_{f,изб} \cdot P''_{изб} = 1,2 \cdot 2,0 = 2,4 \text{ кПа} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2;$$

– вакуума

$$P_{вак} = \gamma_{f,вак} \cdot P''_{вак} = 1,2 \cdot 0,25 = 0,3 \text{ кПа} = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2;$$

– ветра на стенку (в виде условного вакуума)

$$P_w = \gamma_{f,w} \cdot w_0 \cdot c_{e1} \cdot \kappa_0 = 1,4 \cdot 0,3 \cdot 0,5 \cdot 0,81 = 0,17 \text{ кПа} = 0,17 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2,$$

где w_0 – по табл. 2.3; $c_{e1} = 0,5$ – для расчета стенки на устойчивость;

$\kappa_0 = 0,81$ – по табл. 2.4 для местности типа В;

– ветра на покрытие (отсос)

$$P_w^{om} = \gamma_{f,w} \cdot w_0 \cdot c_{e2} = 1,4 \cdot 0,3 \cdot 0,6 = 0,25 \text{ кПа} = 0,25 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2,$$

где $c_{e2} = -0,6$ при $\frac{H}{2 \cdot r} = \frac{18,0}{2 \cdot 23,3} \approx \frac{1}{3}$ – по табл. на стр. 28 [26];

– гидростатического давления жидкости

$$P_{2d} = \gamma_{f,ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot z_{ж},$$

где $z_{ж}$ – см. формулу (3.12).

Устанавливаем минимально необходимую толщину верхнего пояса стенки.

По табл. 3.3 конструктивно необходимая толщина стенки при $D > 35$ м ($D = 46,6$ м) $t_k = 10$ мм. Принимая минусовой допуск на прокат (см. табл. 1.3) $\delta = 0,5$ мм для повышенной точности изготовления листового проката (АТ) и припуск на коррозию $c = 0,1$ мм, получим

$$t_{\min} = t_k + \delta + c = 10,0 + 0,5 + 0,1 = 10,6 \text{ мм.}$$

Принимаем $t_{\min} = 11$ мм, $t_{p, \min} = 11,0 - 0,5 - 0,1 = 10,4$ мм.

Для последующего размещения толщин листов по высоте стенки необходимо определить величину редуцированной высоты стенки H_r по формуле (3.18). Вычислим удельные нагрузки вертикального направления (при отсутствии утеплителя и без учета веса стационарного оборудования) P_1 и кольцевого направления P_2 соответственно по формулам (3.19) и (3.20).

$$P_1 = \bar{g}_{кр} + g_{сн} + \psi \cdot (P_{сак} - P_w^{om}) = \\ = 0,88 \cdot 10^{-4} + 1,8 \cdot 10^{-4} + 0,9 \cdot (0,3 \cdot 10^{-4} - 0,25 \cdot 10^{-4}) = 2,73 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$$

(без учета собственного веса верхней части стенки),

где $\psi = 0,9$ – коэффициент сочетания нагрузок;

$$P_2 = \psi \cdot (P_w + P_{сак}) = 0,9 \cdot (0,17 \cdot 10^{-4} + 0,3 \cdot 10^{-4}) = 0,42 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2.$$

$$\text{При } v = \frac{r}{t_{p, \min}} = \frac{23,3 \cdot 10^2}{1,04} = 2,24 \cdot 10^3 \text{ и}$$

$$c = 1,092 \cdot 10^{-8} \cdot v^2 - 53,686 \cdot 10^{-6} \cdot v + 12,59 \cdot 10^{-2} = \\ = 1,092 \cdot 10^{-8} \cdot 2,24^2 \cdot 10^6 - 53,686 \cdot 10^{-6} \cdot 2,24 \cdot 10^3 + 12,59 \cdot 10^{-2} = 6,00 \cdot 10^{-2}$$

по формуле (3.18) имеем:

$$0,554 + 0,880 \cdot \left(\frac{H_r}{r} \right) = \gamma_c = 1,0.$$

Отсюда $H_r/r = 0,5068$, а $H_r = 0,5068 \cdot 23,3 = 11,8$ м.

По формуле (3.22) определяем значение H^* .

$$\begin{aligned} t_{\min} = 1,1 &= \frac{\gamma_n \cdot (\gamma_{жс} \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot H^* + P_{изб}) \cdot r}{\gamma_c \cdot R_{wy}} = \\ &= \frac{1,1 \cdot (1,1 \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} \cdot H^* + 2,4 \cdot 10^{-4}) \cdot 23,3 \cdot 10^2}{0,8 \cdot 24,0} = \\ &= 10^{-4} \cdot (12,97 \cdot H^* + 320,4). \end{aligned}$$

Отсюда $H^* = 823$ см = 8,23 м. До верха стенки $H_0 = H^* + 30$ см = 853 см = 8,53 м, в пределах которой толщина стенки может быть постоянной и равной минимальной толщине.

Определяем минимальные расчетные толщины в нижележащей части стенки t_c для условий эксплуатации по формуле (3.12), принимая $z_{жс,i} = H_i - 30$ см.

$$\begin{aligned} t_{p,i} &= \frac{\gamma_n \cdot (1,1 \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot z_{жс,i} + P_{изб}) \cdot r}{R_{wy} \cdot \gamma_c} = \\ &= \frac{1,1 \cdot (1,1 \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} \cdot z_{жс,i} + 2,4 \cdot 10^{-4}) \cdot 2330}{24,0 \cdot 0,7} = \\ &= 152,6 \cdot (9,712 \cdot 10^{-6} \cdot z_{жс,i} + 2,4 \cdot 10^{-4}). \end{aligned}$$

При $H_1 = 18$ м $z_{жс,1} = 18,0 - 0,3 = 17,7$ м.

$$t_{p,1} = 152,6 \cdot (9,712 \cdot 10^{-6} \cdot 17,7 \cdot 10^2 + 2,4 \cdot 10^{-4}) = 2,66 \text{ см};$$

$$t_1 = 26,6 + 0,5 + 0,1 = 27,2 \text{ мм.}$$

Принимаем $t_1 = 28$ мм.

При $H_2 = 16,5$ м $z_{жс,2} = 16,2$ м.

$$\begin{aligned} t_{p,2} &= \frac{1,1 \cdot (9,712 \cdot 10^{-6} \cdot 16,2 \cdot 10^2 + 2,4 \cdot 10^{-4}) \cdot 2330}{24,0 \cdot 0,8} = \\ &= 133,5 \cdot (9,712 \cdot 10^{-6} \cdot 16,2 \cdot 10^2 + 2,4 \cdot 10^{-4}) = 2,13 \text{ см}; \end{aligned}$$

$$t_2 = 21,3 + 0,5 + 0,1 = 21,9 \text{ мм.}$$

Примем $t_2 = 22$ мм.

При $H_3 = 15,0$ м $z_{жс,3} = 14,7$ м.

$$t_{p,3} = 133,5 \cdot (9,712 \cdot 10^{-6} \cdot 14,7 \cdot 10^2 + 2,4 \cdot 10^{-4}) = 1,94 \text{ см};$$

$$t_3 = 19,4 + 0,5 + 0,1 = 20 \text{ мм.}$$

Примем $t_3 = 20$ мм.

При $H_4 = 13,5$ м $z_{ж, 4} = 13,2$ м.

$$t_{p,4} = 133,5 \cdot (9,712 \cdot 10^{-6} \cdot 13,2 \cdot 10^2 + 2,4 \cdot 10^{-4}) = 1,74 \text{ см};$$

$$t_4 = 17,4 + 0,5 + 0,1 = 18 \text{ мм.}$$

Примем $t_4 = 18$ мм.

При $H_5 = 12,0$ м $z_{ж, 5} = 11,7$ м.

$$t_{p,5} = 133,5 \cdot (9,712 \cdot 10^{-6} \cdot 11,7 \cdot 10^2 + 2,4 \cdot 10^{-4}) = 1,55 \text{ см};$$

$$t_5 = 15,5 + 0,5 + 0,1 = 16,1 \text{ мм.}$$

Примем $t_5 = 18$ мм.

При $H_6 = 10,5$ м $z_{ж, 6} = 10,2$ м.

$$t_{p,6} = 133,5 \cdot (9,712 \cdot 10^{-6} \cdot 10,2 \cdot 10^2 + 2,4 \cdot 10^{-4}) = 1,355 \text{ см};$$

$$t_6 = 13,55 + 0,5 + 0,1 = 14,15 \text{ мм.}$$

Примем $t_6 = 16$ мм.

При $H_7 = 9,0$ м $z_{ж, 7} = 8,7$ м.

$$t_{p,7} = 133,5 \cdot (9,712 \cdot 10^{-6} \cdot 8,7 \cdot 10^2 + 2,4 \cdot 10^{-4}) = 1,16 \text{ см};$$

$$t_7 = 11,6 + 0,5 + 0,1 = 12,2 \text{ мм.}$$

Примем $t_7 = 14$ мм.

Остальные толщины стенки должны быть не менее 11 мм.

Окончательные значения толщин стенки по высоте устанавливаются с учетом редуцированной высоты стенки по расчетным значениям толщин $t_{ip} = t_i - \delta - c$ так, чтобы фактическое значение редуцированной высоты стенки было бы не более теоретического, т.е.

$$H_{r,\phi} \leq H_r,$$

но как можно ближе к теоретическому значению. Оптимальный вариант распределения толщин стенки при заданной минимальной толщине будет наблюдаться при

$$H_{r,\phi} = H_r.$$

Для определения фактической редуцированной высоты стенки следует толщины поясов привести к расчетным, т.е. $t_{ip} = t_i - 0,6$ мм.

Получим $t_{1p} = 27,4$ мм; $t_{2p} = 21,4$ мм; $t_{3p} = 19,4$ мм; $t_{4p} = t_{5p} = 17,4$ мм; $t_{6p} = 15,4$ мм; $t_{7p} = 13,4$ мм.

Стенка состоит из 12-ти поясов ($\sim 1,5$ м – ширина пояса): $12 \cdot 1,5 = 18$ м = H . Толщины нижних 7-ми поясов определены по прочности. Высота верхних 5-ти поясов составляет 7,5 м, что меньше $H^* = 8,23$ м. Следовательно, толщина верхних 5-ти поясов может быть принята постоянной и равной минимальной.

Найдем фактическую величину редуцированной высоты стенки по формуле (2.12):

$$H_{r,\phi} = \sum_{i=1}^{12} h_i \left(\frac{t_{p,\min}}{t_{ip}} \right)^{2,5} =$$

$$= 1,5 \cdot 1,04^{2,5} \cdot \left(5 + \frac{1}{2,74^{2,5}} + \frac{1}{2,14^{2,5}} + \frac{1}{1,94^{2,5}} + \frac{2}{1,74^{2,5}} + \frac{1}{1,54^{2,5}} + \frac{1}{1,34^{2,5}} \right) =$$

$$= 10,38 \text{ м} < H_r = 11,8 \text{ м},$$

т.е. устойчивость верхней части стенки будет обеспечена.

Итак, имеем следующий набор номинальных толщин поясов стенки:

$$5 \times 11 + 1 \times 14 + 1 \times 16 + 2 \times 18 + 1 \times 20 + 1 \times 22 + 1 \times 28 \text{ мм.}$$

Следует заметить, что верхние 7 поясов могут быть изготовлены в виде рулонов, так как их толщина не превышает 16 мм.

Если требуется рулонирование всей стенки по высоте, то нижние 5 поясов должны быть выполнены из низколегированной стали, для которой рулонизируемая толщина листов до 18 мм. В данном случае рекомендуется определять требуемую величину расчетного сопротивления стали по пределу текучести (R_y^{mp}), задаваясь расчетной толщиной пояса.

Для нижнего наиболее напряженного пояса при $t_1 = 18,0 - 0,6 = 17,4$ мм, $z_1 = 17,7$ м

$$R_{y,1}^{mp} = \frac{\gamma_n \cdot r}{t_1 \cdot \gamma_c} \cdot (1,1 \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot 17,7 \cdot 10^2 + P_{изб}) =$$

$$= \frac{1,1 \cdot 2330}{1,74 \cdot 0,7} \cdot (1,1 \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} \cdot 17,7 \cdot 10^2 + 2,4 \cdot 10^{-4}) = 36,7 \text{ кН/см}^2.$$

Можно принять для нижнего пояса сталь класса С390 ($R_y = 38 \text{ кН/см}^2$), марки 10ХСНД по ГОСТ 19282-73*.

Для 2-го снизу пояса при той же номинальной толщине 18 мм, $z_2 = 16,2$ м требуется $R_{y,2}^{mp} = 29,4 \text{ кН/см}^2$, что соответствует стали класса С345 ($R_y = 31,5 \text{ кН/см}^2$ при $t = 10 \dots 20$ мм), марки 14Г2 по ГОСТ 19282-73*.

Для 3-го снизу пояса найдем требуемую толщину, принимая сталь того же класса и той же марки (14Г2), что и для 2-го пояса.

$$t_{p,3} = \frac{1,1 \cdot 2330}{31,5 \cdot 0,8} \cdot (1,1 \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} \cdot 14,7 \cdot 10^2 + 2,4 \cdot 10^{-4}) = 1,48 \text{ см.}$$

$$t_3 = 14,8 + 0,6 = 15,4 \text{ мм.}$$

Следует принять $t_3 = 16$ мм.

Учитывая то обстоятельство, что 6-ой пояс снизу (из углеродистой стали обыкновенного качества) требует номинальную толщину $t_6 = 16$ мм, имеет смысл промежуточные пояса 4-ый и 5-ый принять толщиной 16 мм.

Далее следует найти фактическое значение редуцированной высоты $H_{r,\phi}$. Расчеты показывают, что если принять 5 верхних поясов по 11 мм толщиной, то стенка будет неустойчивой, так как

$$H_{r,\phi} = 12,15 \text{ м} > H_r = 11,8 \text{ м.}$$

Принимая набор толщин стенки по схеме

$$4 \times 11 + 2 \times 14 + 4 \times 16 + 2 \times 18,$$

стенка будет устойчивой: $H_{r,\phi} = 11,3 \text{ м} < 11,8 \text{ м}$.

Масса стенки составит

$$G_{cm} = 2\pi \cdot r \cdot h_s \cdot \rho_{cm} \cdot \sum t_i = \\ = 2 \cdot 3,14 \cdot 23,3 \cdot 1,5 \cdot 7,85 \cdot (4 \cdot 0,011 + 2 \cdot 0,014 + 4 \cdot 0,016 + 2 \cdot 0,018) = 296 \text{ т}.$$

При наибольшей массе одного рулона равной 60 т требуется 5 рулонов.

Конструирование и расчет днища

Центральную часть днища конструируем из листов 1500×6000 мм толщиной 6 мм в виде 4-х рулонируемых полотнищ. Для стенки из разных марок сталей при толщине нижнего пояса равной $t_1 = 18$ мм минимальная толщина листов окраек 12 мм (см. табл. 3.1). Примем толщину окраек 12 мм и проверим их на изгибающий момент краевого эффекта. Поскольку рассматриваемый резервуар должен опираться на железобетонный фундамент, изгибающий момент краевого эффекта M_0 определяется по уравнению (2.23). Вычислим значения параметров, входящих в уравнение (2.23) по формулам (2.17) и (2.18).

Коэффициент деформации стенки

$$\beta_{cm} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{r^2 \cdot t_{p,1}^2}},$$

где $\nu = 0,3$ – коэффициент Пуассона;

$$t_{p,1} = 18,0 - 0,6 = 17,4 \text{ мм} = 1,74 \text{ см}.$$

$$\beta_{cm} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - 0,3^2)}{2330^2 \cdot 1,74^2}} = 0,02 \frac{1}{\text{см}}.$$

Условный коэффициент постели стенки

$$K_{cm} = \frac{E \cdot t_{p,1}}{r^2} = \frac{2,06 \cdot 10^4 \cdot 1,74}{23,3^2 \cdot 10^4} = 0,0066 \text{ кН/см}^3.$$

Давление на днище

$$P_u = 1,1 \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot H_1 + P_{изб} = 1,1 \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} \cdot (18,0 - 0,3) \cdot 10^2 + 2,4 \cdot 10^{-4} = \\ = 0,0174 \text{ кН/см}^2$$

$$P' = \frac{P_u - P_{изб}}{H_1} = \frac{0,0174 - 0,00024}{1800 - 30} = 9,695 \cdot 10^{-6} \text{ кН/см}^3.$$

Коэффициент канонического уравнения (2.23)

$$\delta_{11}^{cm} = \frac{2 \cdot \beta_{cm}^3}{K_{cm}} = \frac{2 \cdot 0,02^3}{0,0066} = 2,424 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{кН}}.$$

Свободный член канонического уравнения (2.23)

$$\Delta_{1p}^{cm} = -\frac{P_u \cdot \beta_{cm} - P'}{K_{cm}} = -\frac{0,0174 \cdot 0,02 - 9,695 \cdot 10^{-6}}{0,0066} = -0,0513.$$

Цилиндрическая жесткость окрайки днища

$$D_{он} = \frac{E \cdot t_{p,окр}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{2,06 \cdot 10^4 \cdot (1,2 - 0,06)^3}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} = 0,28 \cdot 10^4 \text{ кН}\cdot\text{см}.$$

Полученные значения подставим в уравнение (2.23)

$$2,424 \cdot M_0 + 9,015 \cdot \sqrt{M_0^3} - 513,0 = 0.$$

Отсюда $M_0 = 14,1$ (кН·см)/см.

Проверка окراек по прочности производится по формуле (2.21). Найдем требуемое расчетное сопротивление по пределу текучести для листов окраек по формуле

$$R_y^{mp} = \frac{4 \cdot M_0}{t_{p,окр}^2 \cdot \gamma_c \cdot \gamma_{кр}} = \frac{4 \cdot 14,1}{(1,2 - 0,06)^2 \cdot 1,0 \cdot 1,2} = 36,9 \text{ кН/см}^2,$$

где $\gamma_c = 1,0$; $\gamma_{кр} = 1,2$.

Полученное значение R_y^{mp} соответствует стали класса С390 ($R_y = 38 \text{ кН/см}^2 > R_y^{mp} = 36,9 \text{ кН/см}^2$). Следует заметить, что увеличение толщины окраек почти не изменяет величины нормальных напряжений в листах окраек.

Величина отрыва днища от фундамента определяется по формуле (2.24)

$$l = 2 \cdot \sqrt{\frac{M_0}{P_u}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{14,1}{0,0174}} = 57 \text{ см}.$$

Если применить кольцевой железобетонный фундамент, то ширина кольца по верху должна быть более $l = 57$ см.

3.7. СТАЦИОНАРНЫЕ КРЫШИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Конструкции стационарных крыш зависят от объема резервуара, физических свойств хранимой жидкости и подразделяются на следующие типы:

- а) самонесущая коническая крыша, несущая способность которой обеспечивается конической оболочкой настила (без центральной стойки);
- б) каркасная коническая крыша, состоящая из элементов каркаса и настила;
- в) купольная крыша, поверхность которой близка к сферической и образуется изогнутыми элементами каркаса и укрупненными элементами настила.

Разрешается применение и других конструкций крыш.

Все крыши по периметру опираются на стенку резервуара с использованием кольцевого элемента жесткости. Минимальный размер кольцевого уголка 63×5 мм. Минимальная толщина элементов настила должна составлять 4 мм.

Самонесущая (бескаркасная) коническая крыша в виде конической оболочки применяется для вертикальных резервуаров низкого давления малых объемов (до 500 м^3) и достаточно сложна в исполнении. Геометрические параметры самонесущей конической крыши должны удовлетворять следующим требованиям: максимальный и минимальный угол наклона образующей крыши к горизонтальной плоскости должны составлять соответственно 30° и 15° ($i_{\max} = 0,577$ и $i_{\min} = 0,268$).

Узел крепления крыши к верху стенки выполняется по одному из вариантов, представленных на рис. 3.3.

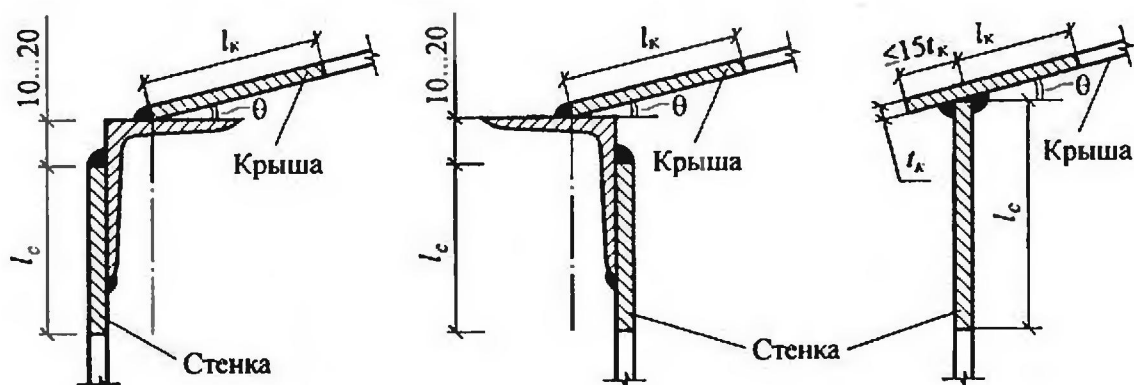


Рис. 3.3. Соединения конической крыши со стенкой (заштрихована площадь сечения опорного кольца крыши)

Каркасная коническая крыша применяется для резервуаров объемом до 5000 м^3 и может быть двух типов:

- в виде сборных щитов трапециевидальной формы в плане (рис. 3.4), опирающихся на стенку (рис. 3.5) и центральное кольцо (рис. 3.6) с настилом, приваренным к каркасу щита;
- с настилом, не приваренным к каркасу щита.

Наклон образующей крыши к горизонтальной поверхности должен составлять $\frac{1}{12} \dots \frac{1}{6}$. Щиты крыши или полотнища настила свариваются между собой внахлестку сверху непрерывным угловым швом. При хранении агрессивных продуктов сварка листов настила крыши, а также приварка их к каркасу должна производиться как сверху, так и снизу сплошным угловым швом.

Купольные (сферические) крыши конструируют в виде ребристо-кольцевых куполов для резервуаров объемом 6000 м^3 и более (рис. 3.7) и сетчатыми при объемах от 1000 до 50000 м^3 (рис. 3.8).

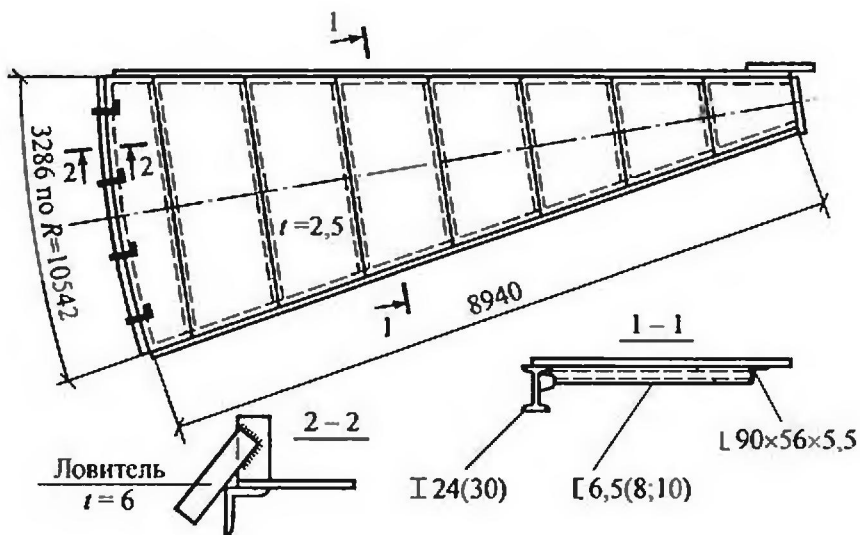


Рис. 3.4. Щит покрытия резервуара вместимостью 5000 м³

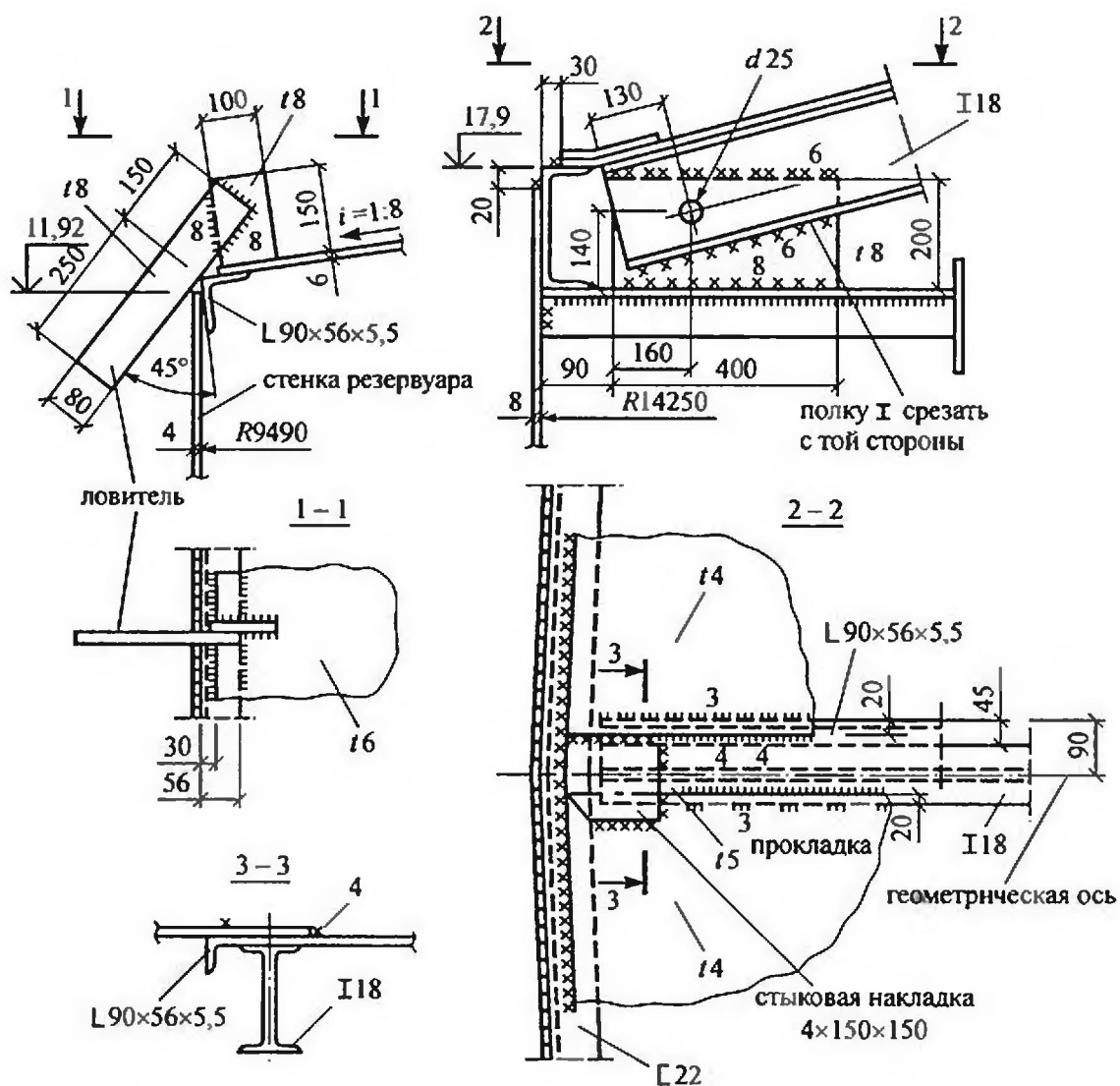


Рис. 3.5. Узел сопряжения конической крыши и стенки резервуара

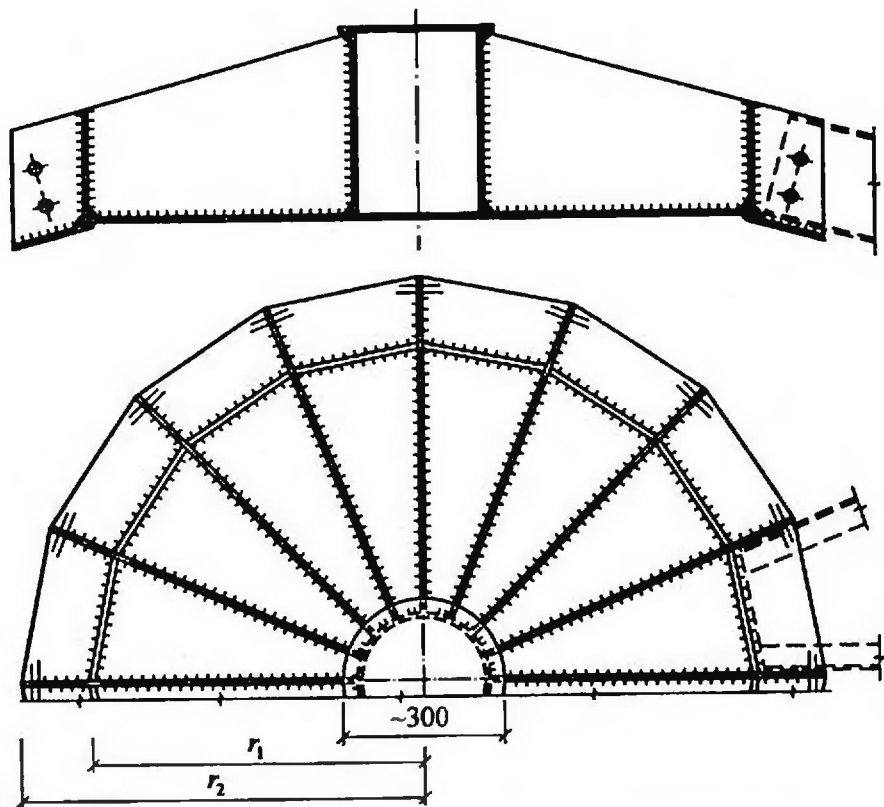


Рис. 3.6. Центральное кольцо конического щитового покрытия резервуара

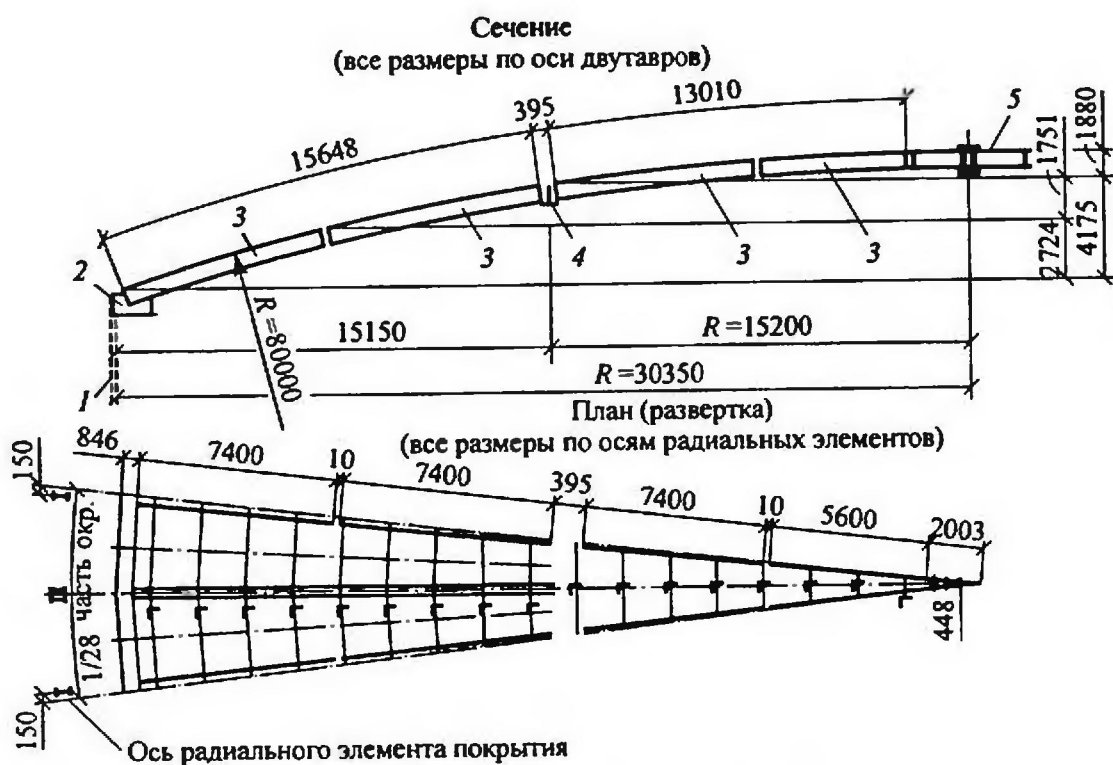


Рис. 3.7. Геометрическая схема ребристо-кольцевого покрытия:
1 – стенка резервуара; 2 – опорное кольцо; 3 – радиальные элементы;
4 – промежуточное кольцо; 5 – центральное кольцо

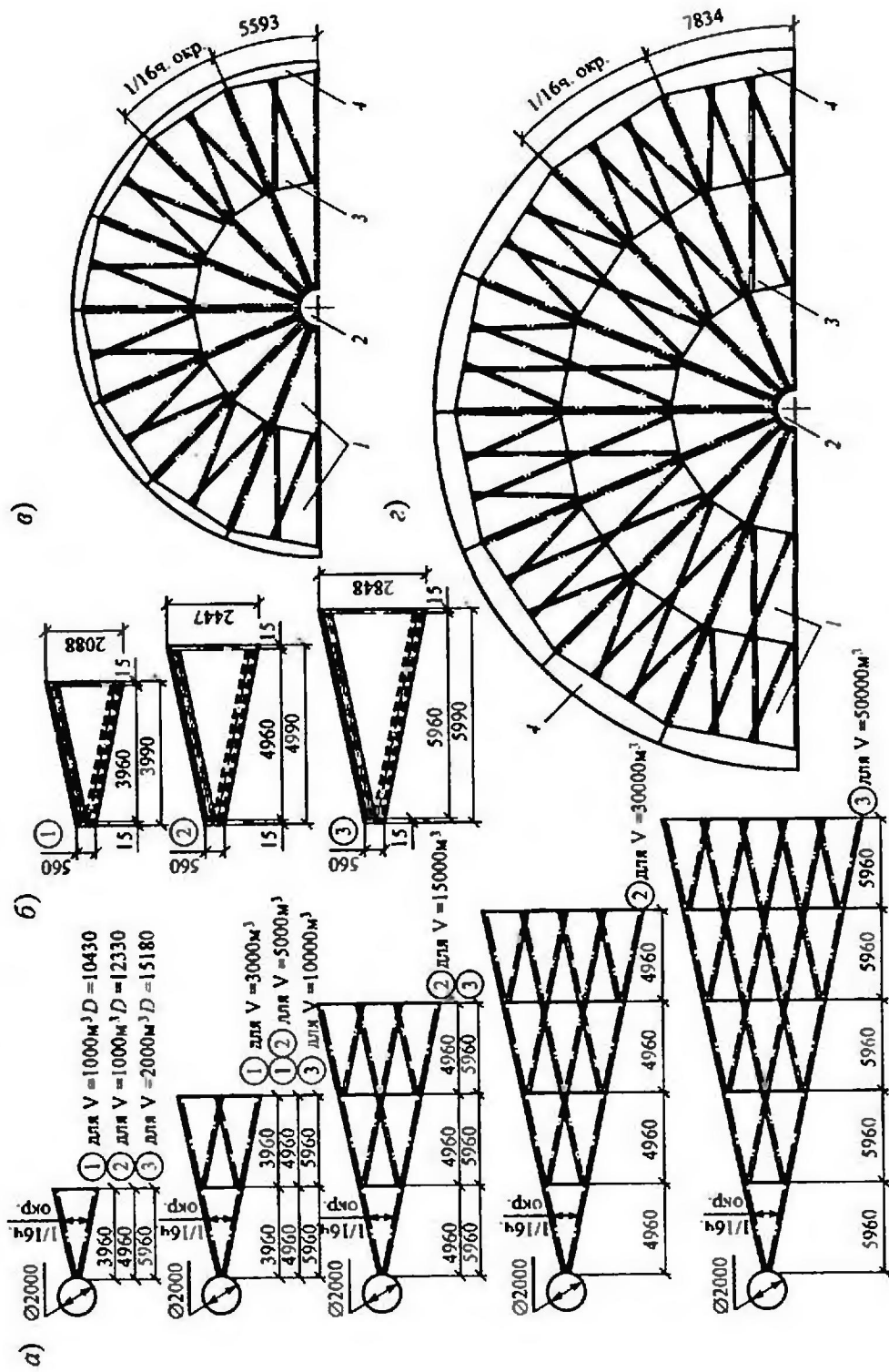


Рис. 3.8. Сетчатый сферический купол из унифицированных элементов

а) схемы укрупненных секторных монтажных шитов покрытия; б) унифицированные шиты покрытия; в) схема покрытия резервуара $V = 10000 \text{ м}^3$; г) то же, $V = 10000 \text{ м}^3$;

1 – шиты покрытия; 2 – центральное кольцо; 3 – вставка; 4 – опорное кольцо

Купольная крыша должна иметь радиус сферической поверхности от $0,8D$ до $1,5D$ (где D – диаметр резервуара). Минимальная толщина настила – 5 мм.

Рекомендуется ребристо-кольцевые купола выполнять в виде щитов, опирающихся на опорное кольцо стенки (рис. 3.9) и на центральное кольцо (рис. 3.10).

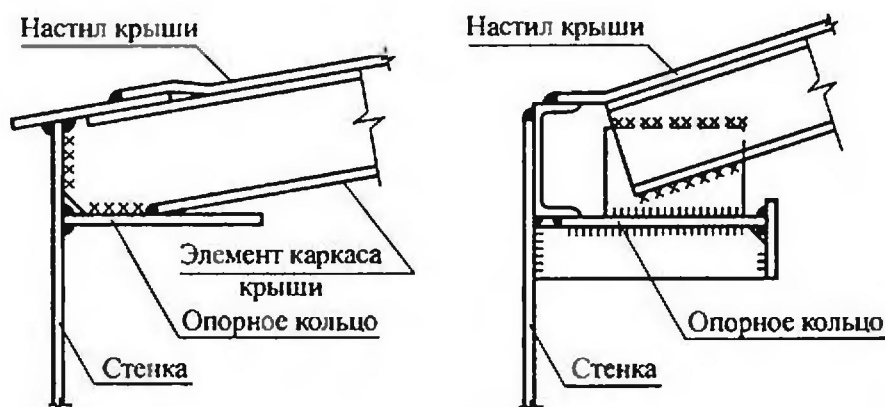


Рис. 3.9. Узлы сопряжения ребер сферической крыши со стенкой

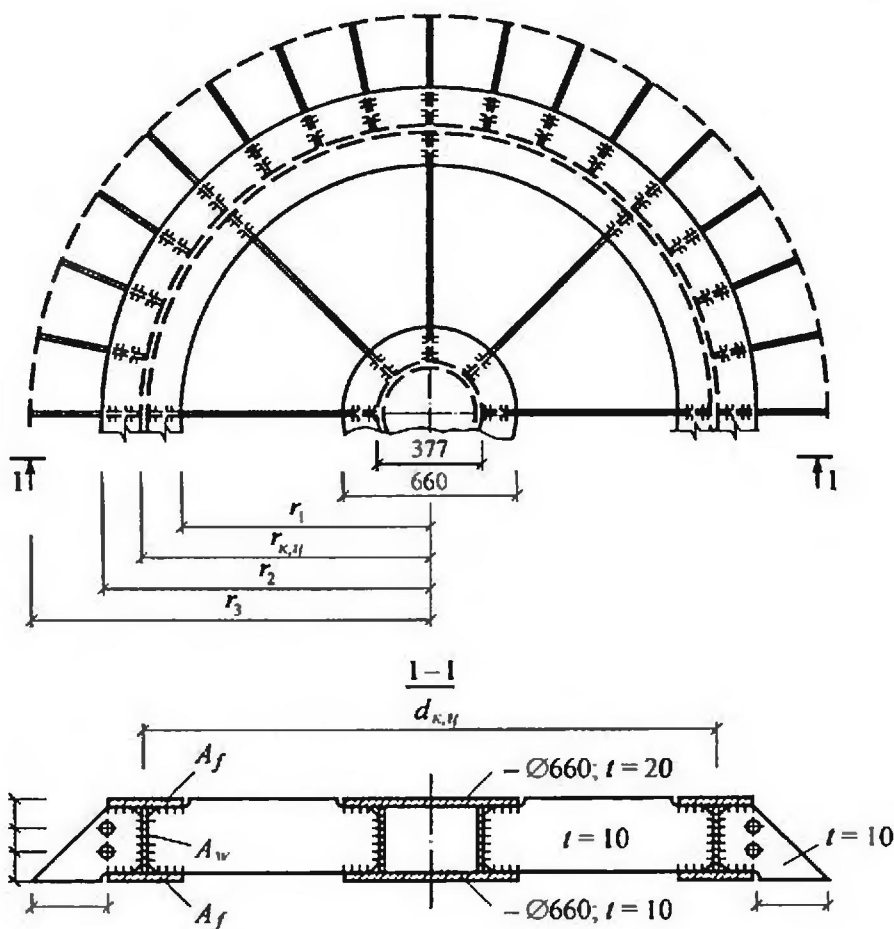


Рис. 3.10. Конструкция центрального кольца сферического покрытия резервуара (настил условно не показан)

3.8. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

Рассматривается три варианта покрытий.

а) Самонесущая коническая крыша

Расчетной схемой крыши является коническая безмоментная оболочка, опирающаяся на опорное кольцо стенки (рис. 3.11).

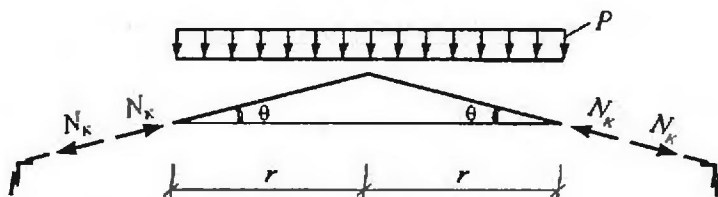


Рис. 3.11. Расчетная схема самонесущей крыши

Минимальная расчетная толщина оболочки крыши t_k по условию устойчивости без припуска на коррозию определяется по формуле

$$t_k = \frac{4,48 \cdot r \cdot \sqrt{\frac{P}{E}}}{\sin \theta}, \quad (3.23)$$

где θ – угол крыши с горизонтальной плоскостью;

P – расчетная нагрузка на единицу горизонтальной плоскости;

$$P = 1,05 \cdot g_{кр}'' + 0,95 \cdot (1,2 \cdot g_y'' + S + 1,2 \cdot P_{вак}''),$$

$g_{кр}''$ – вес 1 м^2 листа крыши;

g_y'' – вес 1 м^2 утеплителя;

S – расчетное значение снеговой нагрузки;

$P_{вак}''$ – возможный вакуум под крышей.

Формула (3.23) применяется для углов $\theta < 30^\circ$ и при выполнении условия

$$\frac{r}{t_k \cdot \sin \theta} > 274, \quad (3.24)$$

которое следует проверить после вычисления первого приближения для t_k . В качестве начального приближения может быть принята минимальная номинальная толщина $t_{k, \min} = 4 \text{ мм}$.

Опорное кольцо крыши (см. рис. 3.3) проверяется на прочность при действии погонного усилия N_k под углом θ к горизонту

$$N_k = \frac{r \cdot P}{2 \cdot \sin \theta}. \quad (3.25)$$

В резервуарах с избыточным давлением при отсутствии утеплителя опорное кольцо крыши должно быть проверено на устойчивость при действии погонного усилия N_k^y , определяемого по формуле

$$N_{\kappa}^y = \frac{r \cdot (P_{изб} - g_{кр, \min})}{2 \cdot \sin \theta}, \quad (3.26)$$

где $g_{кр, \min} = 0,9 \cdot g_{кр}^N$.

Проверка опорного кольца на устойчивость производится по формуле

$$\sigma_{\kappa} = \frac{N_{\kappa}^y}{\varphi \cdot A_{\kappa}} \leq \gamma_c \cdot R_y, \quad (3.27)$$

где коэффициент продольного изгиба φ определяется в зависимости от гибкости

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i_{\kappa}} = \frac{1,8 \cdot r}{i_{\kappa}},$$

i_{κ} – радиус инерции сечения кольца относительно оси, совпадающей с внутренней поверхностью стенки.

В расчетную площадь сечения опорного кольца A_{κ} входят (рис. 3.3):

– участок крыши шириной l_{κ} , определяемый по формуле

$$l_{\kappa} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{r \cdot t_{\kappa}}{\sin \theta}}, \quad (3.28)$$

– участок стенки резервуара шириной l_c , определяемый по формуле

$$l_c = 0,6 \cdot \sqrt{r \cdot t_p}, \quad (3.29)$$

где t_p – толщина стенки резервуара в верхнем сечении;

Подкрепляющий узел элемент принят в виде уголка.

б) Щитовое коническое покрытие с центральной стойкой

Покрытие состоит из плоских трапециевидальных щитов заводского изготовления, опирающихся по периметру стенки резервуара и на центральную стойку через центральное кольцо (см. рис. 3.12 и 3.13). Количество щитов определяется шириной щита у стенки резервуара.

$$b_0 = 3,0 \dots 3,5 \text{ м}; \quad n_{щ} = \frac{\pi \cdot D_p}{b_0}.$$

Щит представляет собой трапециевидальную раму с основными радиальными ребрами из прокатных двутавров. В кольцевом направлении располагают поперечные ребра из мелких номеров прокатного швеллера. Поверх ребер располагается стальной настил толщиной 4,0 мм, который приваривается к ребрам.

Нагрузками на покрытие являются:

– собственный вес настила и ребер – $g_{нр}$;

– вакуум – $g_{вак}$;

– снег – S .

Покрытие с центральной стойкой проектируют пологим с уклоном 1:12.

Расчету подлежат элементы щита:

- настил;
- поперечные ребра;
- радиальные ребра.

Расчетной схемой настила является тонкая оболочка, работающая только на растяжение и опирающаяся на поперечные ребра. Расчетным пролетом настила будет шаг поперечных ребер щита. Сечение настила проверяют по жесткости, принимая значение предельного относительного прогиба

$$\frac{1}{n_0} = \left[\frac{f}{l_n} \right] = \frac{1}{150}, \text{ и по прочности (см. п. 2.4).}$$

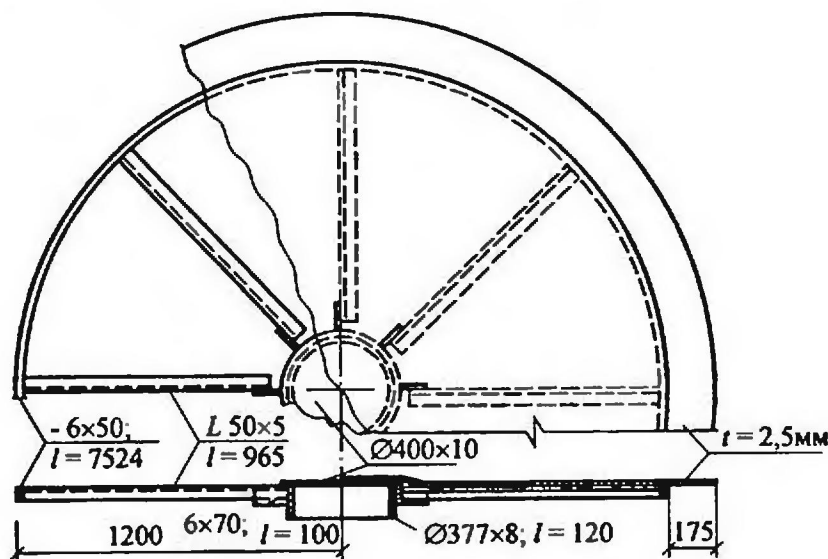


Рис. 3.12. Центральный щит покрытия резервуара

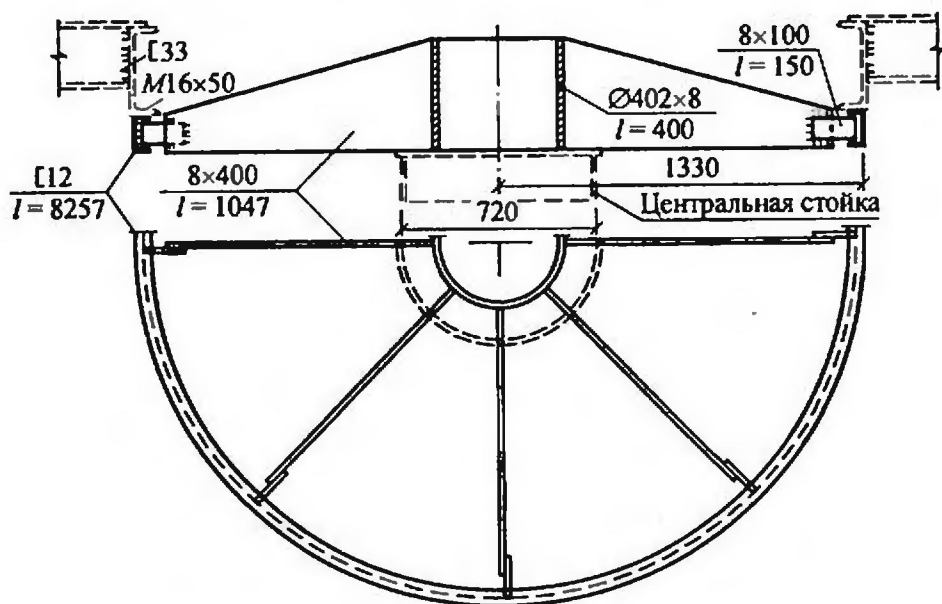


Рис. 3.13. Верхнее кольцо центральной стойки вертикального резервуара

Принимая толщину настила $t_n = 4,0$ мм по условиям эксплуатации, по формуле А. Л. Телояна определяют наибольший пролет настила l_n [17]

$$\frac{l_n}{t_n} = \frac{4 \cdot n_0}{15} \left(1 + \frac{72 \cdot E_1}{n_0^4 \cdot q_n''} \right), \quad (3.30)$$

где l_n/t_n – искомое отношение пролета настила к его толщине;

$$n_0 = \left[\frac{l_n}{f} \right]; \quad E_1 = \frac{E}{1 - \nu^2},$$

ν – коэффициент Пуассона (для стали $\nu = 0,3$);

q_n'' – нормативная погонная нагрузка на полосу настила единичной ширины

$$q_n'' = g_n'' + (g_{\text{вак}}'' + g_{\text{сн}}'') \cdot \psi, \quad (3.31)$$

$$\psi = 0,9; \quad g_n'' = t_n \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot g; \quad g_{\text{сн}}'' = 0,7 \cdot S_g \cdot \mu,$$

$$\mu = 1,0; \quad \rho_{\text{ст}} – \text{плотность стали.}$$

По конструктивным соображениям принимаем шаг поперечных ребер равным 1,2...1,5 м. Затем следует проверить настил на прочность.

Поперечные ребра рассчитываются по простой балочной схеме с равномерно распределенной нагрузкой и с наибольшим пролетом $l_{n,p}$ (для ребра, ближайшего к стенке резервуара).

Нормативная погонная нагрузка

$$q_{n,p}'' = q_n'' \cdot l_n. \quad (3.32)$$

Расчетная погонная нагрузка

$$q_{n,p} = [1,05 \cdot g_n'' + \psi \cdot (1,2 \cdot g_{\text{вак}}'' + S)] \cdot l_n, \quad (3.33)$$

где 1,05 и 1,2 – коэффициенты надежности по нагрузкам.

Расчетный изгибающий момент в сечении поперечного ребра

$$M_{n,p} = \frac{q_{n,p} \cdot l_{n,p}^2}{8}. \quad (3.34)$$

Требуемый момент сопротивления

$$W_{np}^{n,p} = \frac{M_{n,p}}{\gamma_c \cdot R_y}. \quad (3.35)$$

По сортаменту подбирают номер швеллера. Принятое сечение ребра необходимо проверить по предельному прогибу $f/l_{n,p} = 1/200$ или определить требуемый момент инерции и по нему подобрать номер швеллера, сравнив с найденным выше. Относительный прогиб поперечного ребра определяется по формуле

$$\frac{f}{l_{n,p}} = \frac{5}{384} \frac{q_{n,p}'' \cdot l_{n,p}^3}{E \cdot J_{x,p}} \leq \left[\frac{f}{l_{n,p}} \right]. \quad (3.36)$$

Радиальная балка (ребро) щита воспринимает нагрузку по треугольнику (рис. 3.14) в соответствии с грузовой площадью и является основным несущим элементом покрытия. Расчетной схемой радиальной балки является обычная двухопорная шарнирно опертая балка.

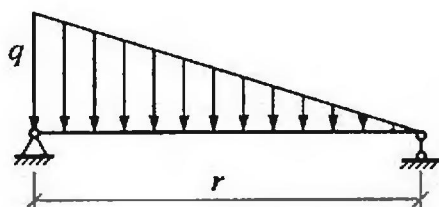


Рис. 3.14. Расчетная схема радиальной балки

Максимальное значение нагрузки на балку будет у стенки резервуара

$$q = g \cdot b_0, \quad (3.37)$$

где $g = g_n + g_0 + (g_{\text{век}} + S) \cdot \psi$,

$g_0 \approx 0,15 \text{ кН/м}^2$ – собственный вес радиальных балок и поперечных ребер;

$\psi = 0,9$ – коэффициент сочетания нагрузок.

Максимальный расчетный момент

$$M = \frac{q \cdot r^2}{9 \cdot \sqrt{3}}. \quad (3.38)$$

Требуемый момент сопротивления с учетом развития пластических деформаций

$$W_{mp} = \frac{M}{1,12 \cdot \gamma_c \cdot R_y}. \quad (3.39)$$

Принятое сечение проверяется по жесткости. Предельное значение относительного прогиба

$$\left[\frac{f}{r} \right] = \frac{1}{250}; \quad \frac{f}{r} = 0,0065 \cdot \frac{q'' \cdot r^3}{E \cdot J} \leq \left[\frac{f}{r} \right]. \quad (3.40)$$

Сечение центральной стойки по конструктивным соображениям (с учетом условий опирания щитов покрытия и использования стойки для рулонирования элементов резервуара) принимают трубчатым диаметром 0,4...0,6 м. По расчету на устойчивость требуется гораздо меньшее сечение стойки.

в) Щитовое коническое покрытие без центральной стойки

Конструкция щита покрытия не отличается от щита покрытия с центральной стойкой, за исключением того, что радиальные балки конструируют из швеллеров. Но этот тип покрытия принципиально отличается от

предыдущего наличием распора, вызывающего сжимающие усилия в радиальных балках и требующего для своего восприятия опорного кольца.

Соединение радиальных ребер щита с центральным кольцом, как правило, осуществляется по шарнирной схеме. Поэтому расчетную схему (рис. 3.15) конического покрытия можно принять статически определимой.

При расчете крыши необходимо учитывать две комбинации нагрузок:

1) нагрузки, действующие на крышу сверху вниз (q): вес конструкций крыши (и теплоизоляции), снег, вакуум (см. формулу (3.37));

2) нагрузки, действующие на крышу снизу вверх (q'): избыточное давление в паровоздушной среде, ветровой отсос, собственный вес крыши

$$q' = [\psi \cdot (P_{изб} + P_w^{om}) - 0,9 \cdot g_{кр}] \cdot b_0.$$

Если $q' < 0$, то рассматривается только первая комбинация нагрузок.

Для первой комбинации нагрузок (q) опорные реакции и усилия в радиальных ребрах щитов определяется по формулам:

– распор

$$H_p = \frac{q \cdot r^2}{6 \cdot h_{кр}}, \quad (3.41)$$

где $h_{кр}$ – см. рис. 3.15;

– вертикальная составляющая опорной реакции

$$V_p = \frac{q \cdot r}{2}; \quad (3.42)$$

– продольное усилие в радиальной балке щита

$$N_p = \frac{q \cdot r}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{r}{3 h_{кр}} \right)^2}, \quad (3.43)$$

где $q = \frac{g}{\cos \theta} \cdot b_0$; g – см. пояснение к формуле (3.37).

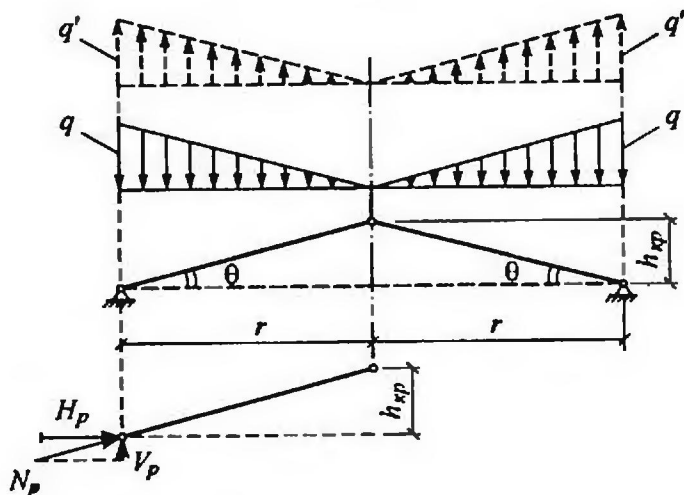


Рис. 3.15. Расчетная схема конического покрытия без центральной стойки

На рис. 3.15 q' – максимальная интенсивность нагрузки на радиальную балку от избыточного давления, ветрового отсоса, собственного веса покрытия. Эта нагрузка вызывает сжатие опорного кольца, расчет которого приводится ниже.

В рассматриваемом случае уклон кровли должен быть больше $\left(i = \frac{1}{8} \dots \frac{1}{12}\right)$, поскольку продольное усилие в радиальной балке и распор резко возрастают при малых уклонах.

Расчетный изгибающий момент в радиальной балке определяется по формуле (3.38). Сечение радиальной балки определяется расчетом на внецентренное сжатие (N_δ и M). При этом номер профиля определяется методом попыток. Задавшись номером швеллера, следует определить приведенный относительный эксцентриситет

$$m_{ef} = \eta \frac{M \cdot A}{N_p \cdot W_x}$$

и условную гибкость

$$\bar{\lambda}_x = \frac{l_{ef}}{i_x} \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad (3.44)$$

где $l_{ef} = \frac{r}{\cos \theta}$.

По m_{ef} и $\bar{\lambda}$ устанавливают по табл. 24 СНиП II-23-81* [28] коэффициент снижения расчетного сопротивления по пределу текучести при внецентренном сжатии φ_e и проверяют радиальное ребро (составленное из двух швеллеров) на устойчивость в плоскости момента по формуле

$$\sigma = \frac{N_p}{\varphi_e \cdot 2A} \leq \gamma_c R_y. \quad (3.45)$$

При значительном недонапряжении или перенапряжении следует изменить номер швеллера в соответствующую сторону и вновь произвести проверку по формуле (3.45).

Настил и поперечные ребра рассчитываются так же, как для покрытия с центральной стойкой.

Для обеспечения совместной работы двух прокатных швеллеров в радиальном ребре покрытия необходимо ставить прокладки между ними на расстоянии не более 40 радиусов инерции одного швеллера относительно собственной вертикальной оси (по типу прокладки между уголками стержней стропильных ферм). Однако стенки швеллеров будут располагаться под углом $\Delta\beta$ (рис. 3.16 и 3.17) между собой в связи с тем, что каждое ребро конического покрытия образуется двумя смежными плоскими щитами, не лежащими в одной плоскости. Поэтому в качестве прокладок наряду с половой сталью можно применять коротыши круглых стержней (длиной 100...120 мм).

Угол $\Delta\beta/2$ определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \frac{\Delta\beta}{2} = \sqrt{\frac{\sqrt{\cos^2 \beta + \operatorname{tg}^2 \theta} - \cos \beta}{\sqrt{\cos^2 \beta + \operatorname{tg}^2 \theta} + \cos \beta}}, \quad (3.46)$$

где угол $\beta = \frac{360^\circ}{2n_{\text{щ}}}$; $n_{\text{щ}}$ – количество щитов в покрытии.

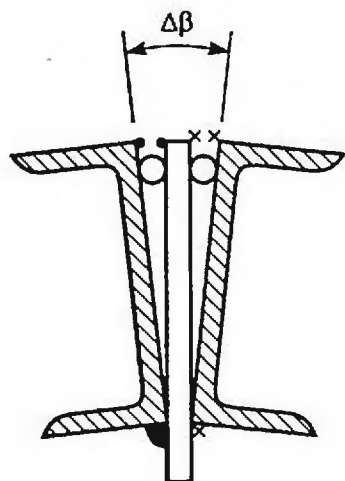


Рис. 3.16. Сечение радиального ребра

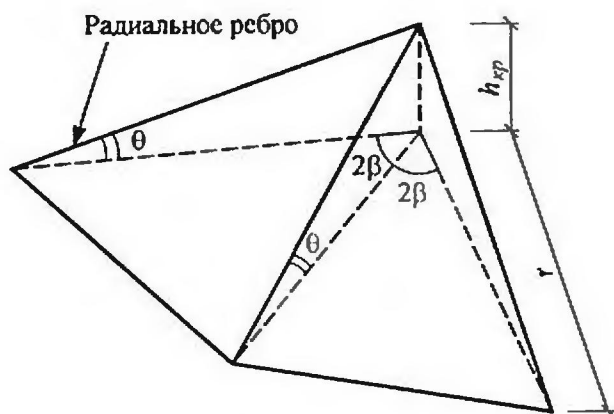


Рис. 3.17. Геометрическая схема фрагмента покрытия

3.9. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ КОНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

Требуется рассчитать и законструировать коническое покрытие вертикального цилиндрического резервуара емкостью $V = 5000 \text{ м}^3$, диаметром $D = 23 \text{ м}$, высотой $H = 15 \text{ м}$, в двух вариантах: с центральной стойкой и без нее для III – снегового и I – ветрового районов. Избыточное давление в паро-воздушном пространстве под крышей – $P_{\text{изб}}^{\text{н}} = 2 \text{ кПа}$; вакуум – $P_{\text{вак}}^{\text{н}} = 0,25 \text{ кПа}$. Расчетное значение снеговой нагрузки – $S = 1,8 \text{ кПа}$ ($\mu = 1,0$), нормативное значение снеговой нагрузки – $S^{\text{н}} = 0,7 \cdot 1,8 = 1,26 \text{ кПа}$; нормативное значение ветровой нагрузки – $w_0 = 0,23 \text{ кПа}$. Материал конструкций покрытия – сталь марки ВСт3пс6 по ГОСТ380-71* [28], $R_y = 235 \text{ МПа}$.

1) Коническое покрытие с центральной стойкой

Покрытие резервуара проектируем в виде щитов, состоящих из листов толщиной $t = 4 \text{ мм}$, уложенных на каркас из двутавра, швеллеров и уголков (рис. 3.4). Щиты опираются на верхнее кольцо центральной стойки и корпус резервуара.

Сбор нагрузок

Определяем нормативные и расчетные нагрузки на щит покрытия:
нормативные, кН/м^2 :

С учетом коэффициента сочетаний нагрузок $\psi = 0,9$:

$$g_{из} = 0,33 + 0,16 + 0,9 \cdot (0,3 + 1,8) = 2,38 \text{ кН/м}^2; \quad g_{из}^H = 1,823 \text{ кН/м}^2.$$

Расчет настила

Принимаем настил приваренным к радиальным ребрам щитов электродами типа Э42. Предельный относительный прогиб настила

$$\left[\frac{f}{l_n} \right] = \frac{1}{150}.$$

Толщина настила $t_n = 4$ мм. Из условия предельного прогиба определяем наибольший пролет настила l_n по формуле (3.30)

$$l_n = \frac{4 \cdot t_n}{15 \cdot \left[\frac{f}{l_n} \right]} \left(1 + \frac{72 \cdot E_1}{\left[\frac{l_n}{f} \right]^4 \cdot q_n^H} \right),$$

где q_n^H – суммарная нормативная нагрузка за вычетом собственного веса радиальных балок и опорных ребер жесткости;

$$q_n^H = 0,314 + 0,9 \cdot (0,25 + 1,26) = 1,673 \text{ кН/м}^2 = 1,673 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2;$$

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

$\nu = 0,3$ – коэффициент Пуассона;

$$l_n = \frac{4 \cdot 150 \cdot 0,4}{15} \cdot \left(1 + \frac{72 \cdot 2,26 \cdot 10^4}{150^4 \cdot 1,673 \cdot 10^{-4}} \right) = 323 \text{ см.}$$

По конструктивным соображениям принимаем расстояние между поперечными ребрами щита, что является пролетом настила, равным 1,5 м.

Проверим настил покрытия на прочность по п. 2.4.

Нагрузка на расчетную полосу настила за вычетом собственного веса радиальных и поперечных ребер жесткости щитов

$$q_n = 0,33 + 0,9 \cdot (0,3 + 1,8) = 2,22 \text{ кН/м}^2 = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2.$$

Шаг поперечных ребер жесткости щита $a = 1,5$ м.

Примем стрелку прогиба настила

$$f_0 = \frac{1}{150} \cdot a = \frac{1}{150} \cdot 150 = 1,0 \text{ см.}$$

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

Распор

$$H = \frac{q_n \cdot a^2}{8 \cdot f_0} - \frac{48 \cdot E_1 \cdot t_n^3}{12 \cdot a^2} = \frac{2,22 \cdot 10^{-4} \cdot 150^2}{8 \cdot 1,0} - \frac{48 \cdot 2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,4^3}{12 \cdot 150^2} = 0,367 \text{ кН/см.}$$

Коэффициент

$$K = \sqrt{\frac{H}{E_1 \cdot J_n}} = \sqrt{\frac{12H}{E_1 \cdot t_n^3}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 0,367}{2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,4^3}} = 0,055 \frac{1}{\text{см}}.$$

Опорный момент

$$M_{on} = \frac{q_n \cdot a}{2K} = \frac{2,22 \cdot 10^{-4} \cdot 150}{2 \cdot 0,055} = 0,303 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

Проверка настила на прочность

$$\sigma = \frac{H}{t_n} + \frac{6 \cdot M_{on}}{t_n^2} = \frac{0,367}{0,4} + \frac{6 \cdot 0,303}{0,4^2} = 12,3 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность настила обеспечена.

Расчет поперечных ребер щита

Предварительно назначим количество щитов в покрытии. Принимая ширину щита у стенки резервуара $b_0 = 3,0$ м, требуемое количество щитов определим по формуле

$$n_{щ} = \frac{\pi \cdot D_p}{b_0} = \frac{3,14 \cdot 23,0}{3,0} = 24,07 \text{ шт.}$$

Количество щитов покрытия должно быть кратным четырем. Принимаем $n_{щ} = 24$ шт. При этом величина

$$b_0 = \frac{\pi \cdot D_p}{n_{щ}} = \frac{3,14 \cdot 23,0}{24} \approx 3,0 \text{ м.}$$

Расчетный пролет поперечного ребра будет равен величине b_0 , т.е. $l_p = b_0 = 3,0$ м. Равномерно распределенная нагрузка на поперечное ребро при шаге ребер $a = 1,5$ м составит

$$q_{p,n} = g_{щ} \cdot a = 2,38 \cdot 1,5 = 3,57 \text{ кН/м} - \text{расчетная нагрузка,}$$

$$q_{p,n}^n = g_{щ}^n \cdot a = 1,823 \cdot 1,5 = 2,73 \text{ кН/м} - \text{нормативная нагрузка.}$$

Расчетный изгибающий момент

$$M_{p,n} = \frac{q_{p,n} \cdot l_p^2}{8} = \frac{3,57 \cdot 3,0^2}{8} = 4,02 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Требуемый момент сопротивления

$$W_{mp} = \frac{M_{p,n}}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{4,02 \cdot 10^2}{1,0 \cdot 23,5} = 17,1 \text{ см}^3.$$

Требуемый момент инерции при предельном относительном прогибе ребра $[f_p/l_p] = 1/200$

$$J_{mp} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{p,n}^n \cdot l_p^3}{E \cdot [f_p/l_p]} = \frac{5 \cdot 2,73 \cdot 10^{-2} \cdot 3,0^3 \cdot 10^6 \cdot 200}{384 \cdot 2,06 \cdot 10^4} = 93,2 \text{ см}^4.$$

Принимаем рекомендуемый швеллер [8: $W_x = 22,4 \text{ см}^3 > W_{mp}$;

$$J_x \approx J_{mp}.$$

Расчет радиальных ребер щита

Пролет радиального ребра, как балки при свободном опирании щита на стенку резервуара и на верхнее центральное кольцо трубчатой стойки равен

$$r = l_p = \frac{D_p}{2} = \frac{23,0}{2} = 11,5 \text{ м.}$$

Максимальная интенсивность нагрузки на радиальное ребро у стенки резервуара по формуле (3.37)

$$q = g_{щ} \cdot b_0 = 2,38 \cdot 3,0 = 7,14 \text{ кН/м.}$$

Расчетная схема радиального ребра изображена на рис. 3.14.

Максимальный расчетный момент по формуле (3.38)

$$M = \frac{q \cdot r^2}{9 \cdot \sqrt{3}} = \frac{7,14 \cdot 11,5^2}{9 \cdot \sqrt{3}} = 60,57 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Требуемый момент сопротивления

$$W_{mp} = \frac{M}{1,12 \cdot \gamma_c \cdot R_y} = \frac{60,57 \cdot 10^2}{1,12 \cdot 1,0 \cdot 23,5} = 230 \text{ см}^3.$$

что соответствует I 23Б1 ($W_x = 260,5 \text{ см}^3$) по ГОСТ 26020-83.

Требуемый момент инерции сечения ребра из условия обеспечения жесткости (при $[f/r] = 1/200$) составит

$$J_{mp} = \frac{5}{768} \cdot \frac{g_{щ}'' \cdot b_0 \cdot r^3}{E \cdot \left[\frac{f}{r} \right]} = \frac{5 \cdot 1,823 \cdot 10^{-4} \cdot 3,0 \cdot 10^2 \cdot 11,5^3 \cdot 10^6 \cdot 200}{768 \cdot 2,06 \cdot 10^4} = 5257 \text{ см}^4.$$

Выберем из сортамента прокатный двутавр №27 ($J_x = 5010 \text{ см}^4 \approx J_{mp}$) по ГОСТ 8239-89. По прочности требуется меньший номер двутавра.

Диаметр центральной стойки принимается по конструктивным соображениям с учетом условий опирания щитов покрытия и использования стойки для рулонирования элементов резервуара.

2) Коническая крыша без центральной стойки

Сбор нагрузок

Комбинация нагрузок сверху вниз будет такой же, как и для крыши с центральной стойкой, т.е. максимальная интенсивность нагрузки на радиальное ребро у стенки резервуара

$$q = 7,14 \text{ кН/м.}$$

Для определения нагрузок снизу вверх найдем величину ветрового отсоса P_w^{om} :

$$P_w^{om} = \gamma_{f,w} \cdot w_0 \cdot c_{e2} = 1,4 \cdot 0,23 \cdot 0,7 = 0,225 \text{ кПа} = 0,225 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2,$$

где $c_{e2} \approx 0,7$ при $H/2r = 1/2,5$ [26].

Вычислим нагрузку от ветра на стенку резервуара в виде условного вакуума, необходимую для расчета опорного кольца.

$$P_w = \gamma_{f,w} \cdot w_0 \cdot c_{e1} \cdot \kappa_0 = 1,4 \cdot 0,23 \cdot 0,5 \cdot 0,75 = 0,12 \text{ кПа} = 0,12 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2.$$

Максимальная интенсивность нагрузки снизу вверх

$$q' = [\psi \cdot (P_{изб} + P_w^{om}) - 0,9 \cdot g_{кр}] \cdot b_0 = \\ = [0,9 \cdot (1,2 \cdot 2,0 + 0,225) - 0,9 \cdot (0,314 + 0,15)] \cdot 3,0 = 5,84 \text{ кН/м},$$

где $g_{кр} = g_n + g_{p,p}$,

$g_n = 0,314 \text{ кПа}$ – собственный вес настила;

$g_{p,p} \approx 0,15 \text{ кПа}$ – собственный вес радиальных и поперечных ребер щитов.

Расчет настила и поперечных ребер щита производится точно так же, как для крыш с центральной стойкой.

Сечение радиального ребра щита примем из прокатного швеллера. Тогда два смежных щита будут иметь общее радиальное ребро из двух прокатных швеллеров (рис. 3.16), сечение которого подбирается и проверяется по первой комбинации нагрузок – сверху вниз (q).

Стрела подъема крыши $h_{кр}$ при уклоне $\text{tg} \theta = i = 0,1$ составит:

$$h_{кр} = r \cdot i = 11,5 \cdot 0,1 = 1,15 \text{ м.}$$

Распор системы по формуле (3.41)

$$H_p = \frac{q \cdot r^2}{6 \cdot h_{кр}} = \frac{7,14 \cdot 11,5^2}{6 \cdot 1,15} = 136,85 \text{ кН.}$$

Вертикальная составляющая опорной реакции системы по формуле (3.42)

$$V_p = \frac{q \cdot r}{2} = \frac{7,14 \cdot 11,5}{2} = 41,06 \text{ кН.}$$

Продольное усилие в радиальном ребре щита по формуле (3.43)

$$N_p = \frac{q \cdot r}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{r}{3h_{кр}} \right)^2} = \frac{7,14 \cdot 11,5}{2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{11,5}{3 \cdot 1,15} \right)^2} = 143 \text{ кН.}$$

Максимальный изгибающий момент в радиальном ребре по формуле (3.38)

$$M_p = \frac{q \cdot r^2}{9 \cdot \sqrt{3}} = \frac{7,14 \cdot 11,5^2}{9 \cdot \sqrt{3}} = 60,6 \text{ кН} \cdot \text{м} = 6060 \text{ кН} \cdot \text{см.}$$

Назначим высоту сечения ребра из условия

$$h_p \approx \frac{r}{50} = \frac{1150}{50} = 23 \text{ см.}$$

Принимаем ребро щита из швеллера [24 ($A = 30,6 \text{ см}^2$; $W_x = 242 \text{ см}^3$; $i_x = 9,73 \text{ см}$).

Проверим сечение ребра из 2-х швеллеров на устойчивость при внецентренном сжатии по формуле

$$\sigma = \frac{N_p}{\varphi_e \cdot 2A} \leq \gamma_c \cdot R_y.$$

Условная гибкость

$$\bar{\lambda} = \frac{r}{i_x} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{1150,0}{9,73} \cdot \sqrt{\frac{23,5}{2,06 \cdot 10^4}} = 4,0.$$

Относительный эксцентриситет

$$\bar{m} = \frac{M_p \cdot A}{N_p \cdot W_x} = \frac{6060,0 \cdot 30,6}{143,0 \cdot 242,0} = 5,36.$$

При $\bar{m} = 5,36$, $\bar{\lambda} = 4,0$ и $A_f / A_w \approx 0,5$ имеем

$$\begin{aligned} \eta &= (1,75 - 0,1 \cdot \bar{m}) - 0,02 \cdot (5 - \bar{m}) \cdot \bar{\lambda} = \\ &= (1,75 - 0,1 \cdot 5,36) - 0,02 \cdot (5 - 5,36) \cdot 4,0 = 1,243; \end{aligned}$$

$$m_{ef} = \eta \cdot \bar{m} = 1,243 \cdot 5,36 = 6,66.$$

При $m_{ef} = 6,66$ и $\bar{\lambda} = 4,0$ по табл. 74 [28] $\varphi_e = 0,132$.

$$\sigma = \frac{143,0}{0,132 \cdot 2 \cdot 30,6} = 17,7 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_y = 23,5 \text{ кН/см}^2.$$

Для второй комбинации нагрузок (снизу вверх) имеем:

$$q' = 5,84 \text{ кН/м}.$$

Отношение $q'/q = 5,84/7,14 = 0,82 < 1,0$ – проверку ребра на внецентренное растяжение можно не делать.

Вычислим угол $\Delta\beta$ между двумя смежными щитами по формуле (3.46). При $b_0 = 3,0 \text{ м}$ и $r = 11,5 \text{ м}$ количество щитов в покрытии

$$n_{щ} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{b_0} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 11,5}{3,0} \approx 24 \text{ шт.}$$

Угол β (см. рис. 3.17) определяется по формуле

$$\beta = \frac{360^\circ}{2 \cdot n_{щ}} = \frac{360^\circ}{2 \cdot 24} = 7,5^\circ.$$

Тангенс угла θ : $\text{tg } \theta = \frac{h_{kp}}{r} = \frac{1,15}{11,5} = 0,1$.

Подставляя полученные значения углов β и θ в формулу (3.46), найдем

$$\Delta\beta = 1,43^\circ.$$

Зная величину угла $\Delta\beta$ и номер швеллера радиального ребра, можно определить требуемый диаметр круглого вкладыша.

3.10. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СФЕРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

3.10.1. Характеристика ребристо-кольцевого купола [14]

Конструкция ребристо-кольцевого купола состоит из плоских криволинейных ребер, установленных в радиальном направлении и соединенных между собой рядом колец, образующих совместную пространственную систему. Чаще всего применяются ребристо-кольцевые купола, собираемые из трапецевидных щитов заводского изготовления (см. рис. 3.4).

В отличие от конического покрытия щит ребристо-кольцевого купола имеет радиальные ребра, изогнутые в радиальной плоскости по дуге окружности. Кроме того, в куполе применяют в зависимости от диаметра резервуара два и более типов (ярусов) щитов, тогда как в коническом покрытии используется только один тип (ярус) щитов.

Если законструировать все узлы купола жесткими, система становится многократно статически неопределимой, достаточно трудоемкой для расчета даже с использованием вычислительной техники. Однако если законструировать все узлы конструкции купола шарнирными, то трудоемкость расчета резко снижается (рис. 3.18). Ниже рассматривается расчет именно такого купола (с шарнирными узлами).

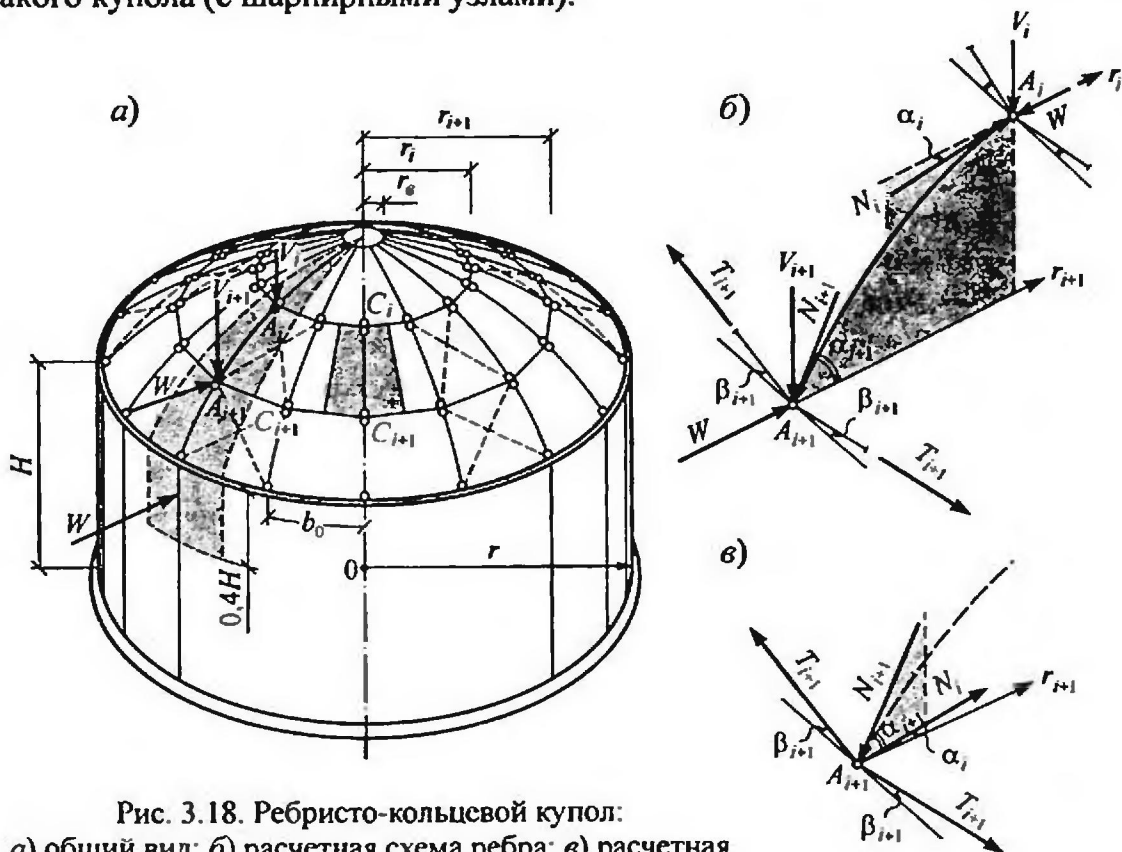


Рис. 3.18. Ребристо-кольцевой купол:

а) общий вид; б) расчетная схема ребра; в) расчетная схема узла промежуточного кольца

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

Жесткость купола на кручение обеспечивается стальным настилом и системой связей.

3.10.2. Нагрузки на купол

При расчете элементов купола участвуют нагрузки:

- **вертикального** направления:

- вниз

$$q = \gamma_{f,щ} \cdot g_{щ} + (\gamma_{f,вак} \cdot P_{вак}'' + S_g \cdot \mu) \cdot \psi,$$

- вверх

$$q_1 = (\gamma_{f,изб} \cdot P_{изб}'' + \gamma_{f,от} \cdot w_m) \cdot \psi - 0,9 \cdot g_{щ},$$

} (3.47)

где $\gamma_{f,щ} = 1,05$; $\gamma_{f,вак} = 1,2$; $\gamma_{f,изб} = 1,2$; $\gamma_{f,от} = 1,4$;

$\psi = 0,9$ – коэффициент сочетания нагрузок;

$g_{щ}$ – собственный вес щитов; $g_{щ} = 0,7 \dots 1,0$ кН/м²;

$P_{вак}''$ – вакуум нормативный;

S_g – расчетная снеговая нагрузка;

$\mu = 1,0$ (см. формулу 2.38);

$P_{изб}''$ – нормативное значение избыточного давления;

w_m – нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки

- **горизонтального** направления, собираемые с верхней части резервуара равной $0,4 H$ (H – высота резервуара):

- нагрузки, вызывающие сжатие опорного кольца купола – W : активное давление ветра и вакуум;

- нагрузки, вызывающие растяжение опорного кольца + W_1 : ветровой отсос и избыточное давление (рис. 3.18).

Остановимся на сборе нагрузок горизонтального направления.

В горизонтальной плоскости активное давление ветра передается на сектор стенки с центральным углом $\sim 80^\circ$ (см. п. 2.5 и рис. 2.13). При этом, как показано ранее, аэродинамический коэффициент c можно принимать равным 0,5. Тогда сосредоточенное давление на участок резервуара высотой $0,4H$ и шириной b_0 (b_0 – шаг радиальных ребер по дуге окружности, см. рис. 3.18) определяется по формуле

$$W = 0,4 \cdot H \cdot b_0 \cdot (1,4 \cdot w_m + 1,2 \cdot P_{вак}''), \quad (3.48)$$

где $w_m = w_0 \cdot c \cdot K_0$,

$c = 0,5$; c и K_0 – см. п. 2.5.

Наибольшее значение ветрового отсоса на стенку резервуара в плане располагается под углом в 70° к направлению ветра. Максимальное значение аэродинамического коэффициента в этой точке $c_{\max} = 1,13$ (см. рис. 2.12). Для расчетов можно применять $c = 1,0$. Сосредоточенное давление, вызывающее растяжение опорного кольца,

$$W_1^+ = 0,4 \cdot H \cdot b_0 \cdot (1,4 \cdot w_m + 1,2 \cdot P_{\text{изб}}^H), \quad (3.49)$$

где $w_m = w_0 \cdot 1,0 \cdot \kappa_0$.

Вертикальная сосредоточенная нагрузка, приходящаяся на i -й узел пересечения радиального ребра с i -м кольцом, определяется по формуле

$$V_i = \frac{q(q_l) \cdot \pi \cdot r_i \cdot (r_{i+1} - r_{i-1})}{n_{\text{ш}}}, \quad (3.50)$$

где $n_{\text{ш}}$ — количество щитов одного яруса;

r_i — радиус i -го кольца.

3.10.3. Расчет радиальных ребер купола

Щиты купола опираются своими радиальными ребрами на кольца и передают сосредоточенную нагрузку на них. Поэтому нагрузка с поверхности щита полностью воспринимается радиальными ребрами. В соответствии с грузовой площадью, приходящейся на радиальное ребро, $C_i - C_{i+1}$ (рис. 3.18 а), расчетные схемы радиального ребра изображены на рис. 3.18 б и рис. 3.19.

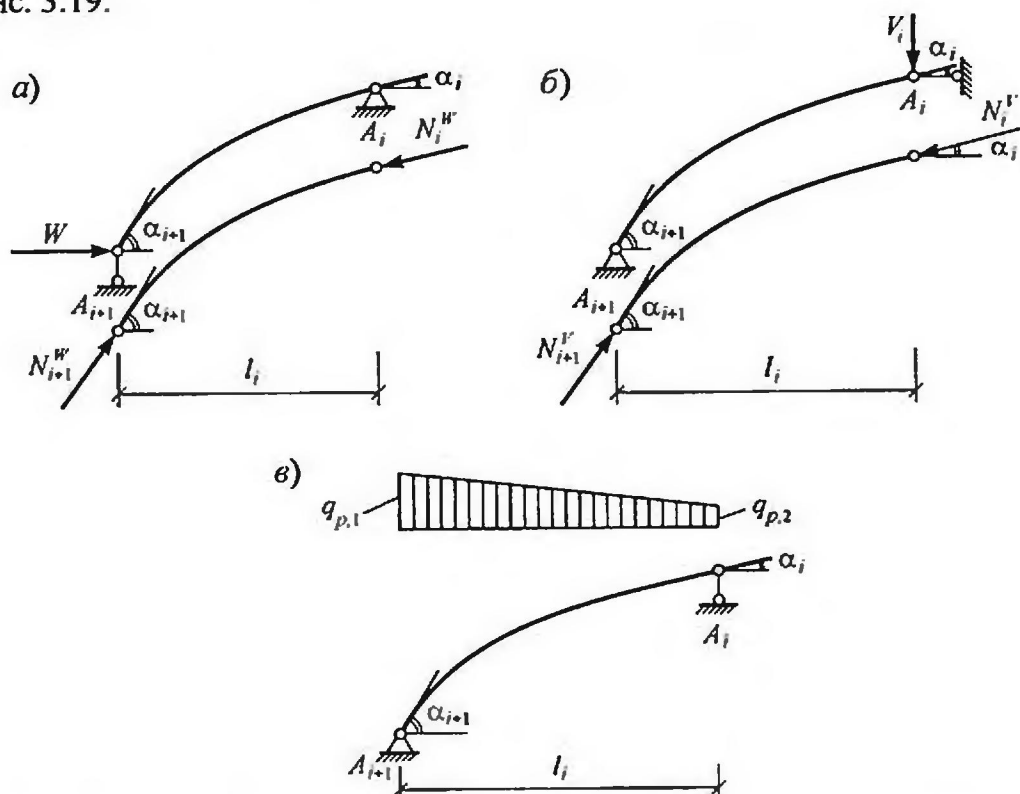


Рис. 3.19. Расчетные схемы радиального ребра купола на нагрузки:

а) горизонтальную; б) вертикальную; в) местную

Суммарное продольное сжимающее усилие в ребре

$$N_{i+1} = \psi \cdot N_{i+1}^W + N_{i+1}^V + N_{i+1}^q, \quad (3.51)$$

где $\psi = 0,9$ – коэффициент сочетания нагрузок;

N_{i+1}^W – продольное усилие от горизонтальной нагрузки W :

$$N_{i+1}^W = \frac{W}{\cos \alpha_{i+1}};$$

N_{i+1}^V – продольное усилие от вертикальной нагрузки V_i :

$$N_{i+1}^V = \frac{V_i}{\sin \alpha_{i+1}};$$

N_{i+1}^q – продольное усилие от местной нагрузки q :

$$N_{i+1}^q \approx \frac{(q_{p,1} + q_{p,2}) \cdot l_i}{2} \cdot \sin \alpha_i^{\text{cp}},$$

$$q_{p,1} = q \cdot b_{i+1}; \quad q_{p,2} = q \cdot b_i; \quad \alpha_i^{\text{cp}} = \frac{\alpha_{i+1} + \alpha_i}{2}.$$

От местной нагрузки q в ребре кроме продольной силы N_{i+1}^q будут и изгибающие моменты. Наибольший изгибающий момент будет в сечении на расстоянии x от левой опоры:

$$x = \frac{q_{p,1} \cdot l_i}{\Delta q} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2A \cdot \Delta q}{q_{p,1}^2 \cdot l_i}} \right], \quad (3.52)$$

где $\Delta q = q_{p,1} - q_{p,2}$;

$$A = \frac{l_i}{3} \left(q_{p,1} + \frac{q_{p,2}}{2} \right).$$

Суммарное продольное растягивающее усилие в ребре определяется по формуле (3.51) с заменой q на q_1 (см. формулы (3.47)).

Проверка прочности радиального ребра как сжатого или растянутого стержня с местной поперечной нагрузкой производится по формуле

$$\sigma = \frac{N_{i+1}}{A_i} + \frac{M_i}{W_{i,\min}} \leq \gamma_c \cdot R_y, \quad (3.53)$$

где $M_i = \frac{q(q_1) \cdot b_i^3}{12}$,

b_i – шаг ребер на i -ом кольце;

$\gamma_c = 1,0$ – коэффициент условий работы купола;

A_i и $W_{i,\min}$ – соответственно площадь и минимальный момент сопротивления сечения ребра.

Предварительно сечением ребра следует задаться. Высота сечения ребра $h_p \approx (1/50) \cdot l_p$. Ребро не проверяется на устойчивость как внецентренно сжатый стержень, поскольку к нему приваривается настил в конструкции щита (в плоскости настила).

При определении продольных усилий в радиальном ребре необходимо знать углы наклона касательной по концам ребра с горизонтальной осью (α_{i+1} , α_i), которые определяются по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r - x}{\sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{r^2}{f} - f \right)^2 + x \cdot (2r - x)}}, \quad (3.54)$$

где x , r и f – показаны на рис. 3.20;

r – радиус резервуара;

f – стрела подъема купола;

$$\frac{f}{r} \approx \frac{1}{6} \dots \frac{1}{8}.$$

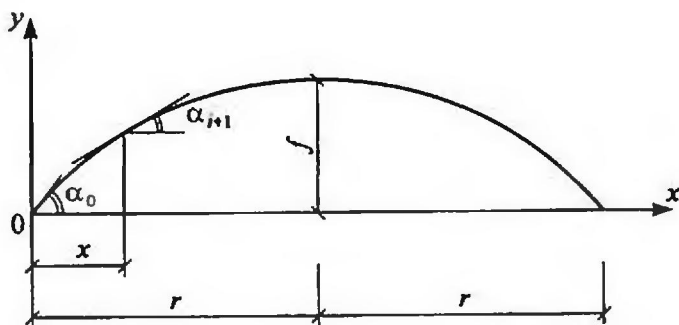


Рис. 3.20. Геометрия радиального ребра

3.10.4. Расчет кольцевых элементов

Кольцевые элементы образуются кольцевыми ребрами купола. Купол собирают из нескольких ярусов щитов в зависимости от диаметра резервуара. Каждый ярус состоит из одинаковых щитов, опирающихся своими торцами на правильные многоугольники, называемые условно кольцами. Опорное кольцо купола, располагаемое по верхнему краю стенки резервуара, является одновременно и кольцом жесткости резервуара.

Опорное кольцо – важный несущий элемент сферического покрытия и верхней части стенки резервуара, который, помимо распора ребристо-кольцевого купола, воспринимает воздействие вакуума, избыточного давления и ветрового напора на 0,4 высоты стенки.

Радиальные ребра купола передают на опорное кольцо горизонтальные силы в виде распоров P (распор P – горизонтальные составляющие продольного усилия ребра N_{on}), величина которых определяется по формуле

$$P = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot q}{n_{иц}} \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0, \quad (3.55)$$

где q – вертикальная нагрузка на купол, направленная сверху вниз и определяемая по формуле (3.47);

α_0 – находится по формуле (3.54) при $x = 0$.

Расчетная схема опорного кольца на действие распоров изображена на рис. 3.21.

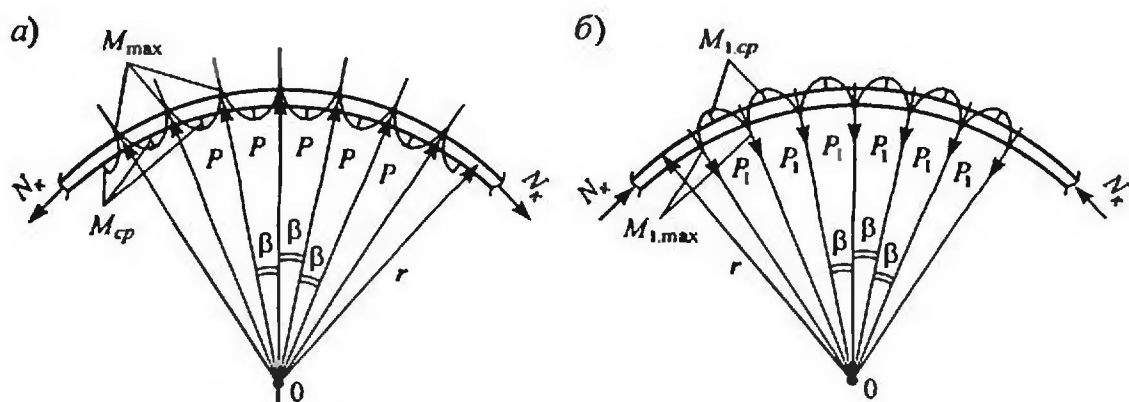


Рис. 3.21. Расчетные схемы опорного кольца на вертикальную нагрузку на купол:
а) действие нагрузки q ; б) действие нагрузки q_1 (см. формулы (3.47))

Распоры вызывают в кольце изгибающие моменты и продольные силы, определяемые по формулам [25]:

– максимальный момент (под радиальным ребром)

$$M_{\max} = -\frac{P \cdot r}{2} \left(\frac{n_{\text{ш}}}{\pi} - \text{ctg} \frac{\pi}{n_{\text{ш}}} \right), \quad (3.56)$$

– момент между ребрами

$$M_{\text{ср}} = \frac{P \cdot r}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\pi}{n_{\text{ш}}}} - \frac{n_{\text{ш}}}{\pi} \right), \quad (3.57)$$

– продольное усилие

$$N_{\kappa} = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\pi}{n_{\text{ш}}}}. \quad (3.58)$$

Распоры P_1 (рис. 3.21 б) порождают моменты и продольные силы, определяемые по формулам (3.56), (3.57) и (3.58) обратного знака.

Дополнительные максимальные сжимающие продольные усилия в опорном кольце от вакуума $N_{\kappa, \text{вак}}$ и ветрового давления $N_{\kappa, \text{в}}$ на верхней части стенки резервуара высотой $0,4 \cdot H$ и соответствующий момент $M_{\kappa, \text{в}}$ определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} N_{\kappa, \text{вак}} &= -0,4 \cdot H \cdot \gamma_{f, \text{вак}} \cdot P_{\text{вак}}^{\text{II}} \cdot r \\ N_{\kappa, \text{в}} &= -0,4 \cdot H \cdot \gamma_{f, \text{в}} \cdot c_{e1} \cdot w_0 \cdot \kappa_0 \cdot r \cdot \sin 36^\circ \\ M_{\kappa, \text{в}} &= -0,4 \cdot H \cdot \gamma_{f, \text{в}} \cdot c_{\text{гсг}} \cdot w_0 \cdot \kappa_0 \cdot r^2 \end{aligned} \right\}, \quad (3.59)$$

где $c_{e1} = 1,0 - 0,4 = 0,6$;

$c_{уст}$ – условный аэродинамический коэффициент, учитывающий воздействие ветровой нагрузки на разные секторы кольца (рис. 3.22), определяемый по формуле:

$$c_{уст} = c_{e1} \cdot \zeta_1 + c'_{e1} \cdot \zeta'_1,$$

где $\zeta_1 = 0,192$; $\zeta'_1 = 0,239$ – коэффициенты, определяемые по формулам табл. 5 [25] для нахождения изгибающих моментов в кольце.

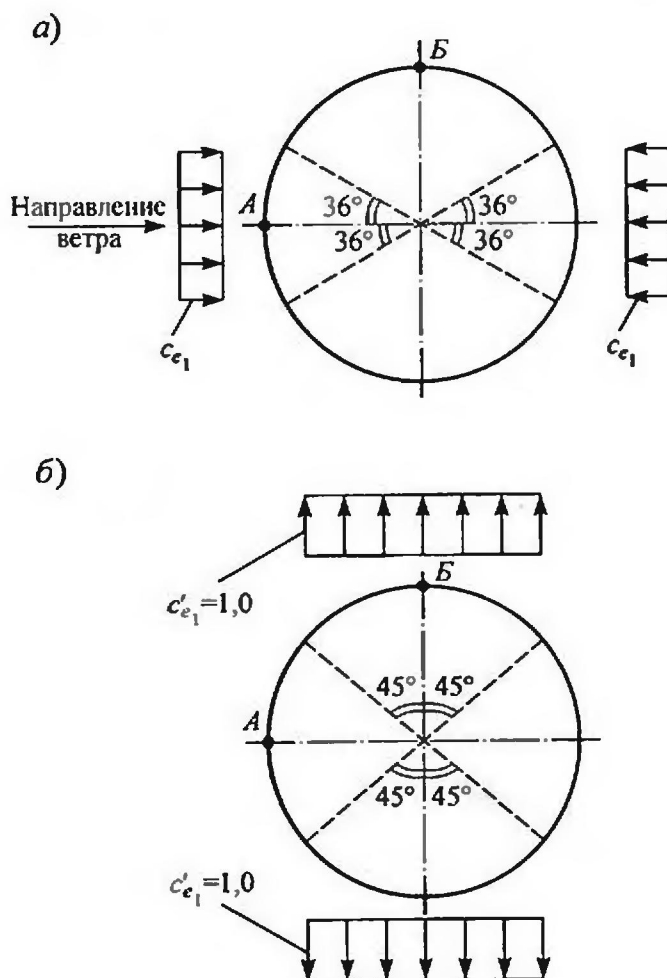


Рис. 3.22. Упрощенная эпюра c_B для определения изгибающего момента в кольце: а) в направлении ветровой нагрузки; б) перпендикулярно направлению ветровой нагрузки

В точке B будет наибольшее сжимающее усилие и соответствующий изгибающий момент от ветровой нагрузки на стенку резервуара, определяемого как сумма двух моментов:

– от ветровой нагрузки на сектор кольца с центральным углом 72° и шириной 1 м (рис. 3.22 а)

$$M_{B,72^\circ} = -\zeta_1 \cdot \gamma_{f,в} \cdot c_{e1} \cdot w_0 \cdot K_0 \cdot r^2, \quad (3.60)$$

– от ветровой нагрузки на сектор кольца с центральным углом 90° и шириной 1 м (рис. 3.22 б)

$$M_{B,90^\circ} = -\zeta_1 \cdot \gamma_{f,g} \cdot c'_{e_1} \cdot w_0 \cdot \kappa_0 \cdot r^2, \quad (3.61)$$

где $c_{e_1} = 0,6$; $c'_{e_1} = 1,0$.

Суммарный момент в точке B от ветровой нагрузки на стенку высотой $0,4H$:

$$M_{K,g}^- = 0,4 \cdot H \cdot (M_{B,72^\circ} + M_{B,90^\circ}) = -0,14 \cdot H \cdot r^2 \cdot \gamma_{f,g} \cdot w_0 \cdot \kappa_0. \quad (3.62)$$

В точке A кольца от ветровой нагрузки будет наибольшее растягивающее усилие и соответствующий момент, определяемые по формулам

$$N_{K,g}^+ = 0,4 \cdot H \cdot \gamma_{f,g} \cdot c'_{e_1} \cdot w_0 \cdot \kappa_0 \cdot r \cdot \sin 45^\circ; \quad (3.63)$$

$$M_{K,g}^+ = 0,14 \cdot H \cdot r^2 \cdot \gamma_{f,g} \cdot w_0 \cdot \kappa_0.$$

Возможными расчетными сочетаниями усилий для опорного кольца будут:

1) от вертикальных нагрузок сверху вниз q на покрытие и вакуум на $0,4H$ стенки:

$$M_{\max} \text{ или } M_{cp}, N_K, N_{K, \text{вак}};$$

2) от вертикальных нагрузок снизу вверх q_1 на покрытие, избыточного давления и ветрового давления на $0,4H$ стенки:

$$\bar{M}_{1, \max} \text{ или } \bar{M}_{1, cp}, \bar{N}_{1, K}, N_{K, \text{изб}}, N_{K, g}, M_{K, g};$$

3) от вертикальных нагрузок сверху вниз q на покрытие, ветрового давления и вакуум на $0,4H$ стенки (с учетом ветрового отсоса на покрытие):

$$M_{cp}, M_{K, g}, N_K, N_{K, \text{вак}}, N_{K, g}.$$

Для проверки кольца по прочности на совместное действие момента и продольной силы следует выбрать самое невыгодное сочетание усилий.

Расчет промежуточных колец рассматриваемого щитового купола осуществляется только на продольные усилия (растягивающие и сжимающие), так как радиальные ребра щитов опираются в узлах купола. При назначении числа промежуточных колец следует иметь в виду, что длина щита покрытия принимается равной 8...12 м.

Продольное усилие в кольцевом элементе определяется по формуле

$$N_{K, i+1} = \frac{1}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{n_{\text{щ}}}} (N_{i+1} \cdot \cos \alpha_{i+1} - N_i \cdot \cos \alpha_i), \quad (3.64)$$

где N_{i+1} и N_i – продольные усилия по концам радиального ребра, определяемые по формуле (3.51), с учетом только слагаемого N_{i+1} и, что ветровая нагрузка на стены будет восприниматься опорным кольцом.

Кольцо будет испытывать сжатие при действии вертикальной нагрузки сверху вниз q и растяжение от вертикальной нагрузки снизу вверх q_1 , определяемые по формулам (3.47).

При расчете на устойчивость многоугольник заменяется кольцом радиуса r_i и проверяется в своей плоскости по формуле

$$N_{k,l+1} \leq N_{kp} = \frac{3EJ_k}{1,3 \cdot r^2}, \quad (3.65)$$

где J_k – момент инерции сечения кольца относительно вертикальной оси.

Если настил приваривается к кольцам, то они проверяются только на прочность по формуле

$$\sigma = \frac{N_{\max}}{A} \leq \gamma_c \cdot R_y. \quad (3.66)$$

3.11. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ РЕБРИСТО-КОЛЬЦЕВОГО КУПОЛА

По данным примера п. 3.6. требуется запроектировать ребристо-кольцевой купол для вертикального цилиндрического резервуара с размерами $V = 30000 \text{ м}^3$; $H = 18 \text{ м}$; $D = 53,43 \text{ м}$.

3.11.1. Установление габаритных размеров сферического покрытия

Назначают стрелку подъема f и вычисляют радиус сферы купола (рис. 3.23). Стрелку подъема купола f рекомендуется принять

$$f \approx \frac{1}{6} \cdot r = \frac{1}{6} \cdot 26,72 = 4,45 \text{ м.}$$

Радиус сферы

$$r_{сф} = \frac{r^2 + f^2}{2f} = \frac{26,72^2 + 4,45^2}{2 \cdot 4,45} = 82,4 \text{ м} \approx 1,5 \cdot D.$$

Длина щита покрытия колеблется в пределах 8...12 м. Центральный угол сферы α определяется по формуле

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{r}{r_{сф}} = \frac{26,72}{82,40} = 0,3243,$$

отсюда $\alpha/2 = 18,92^\circ$; $\alpha = 37,84^\circ$.

Длина дуги купола в вертикальной плоскости

$$L_{кп} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{сф} \cdot \alpha}{360} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 82,4 \cdot 37,84}{360} = 54,39 \text{ м.}$$

Половину длины дуги следует разделить на целое число ярусов щитов покрытия и выделить радиус верхнего центрального кольца. Примем длину щита по дуге окружности $l_{щ}^o = 8,7 \text{ м}$. При этом радиус центрального кольца согласно рис. 3.23

$$r_{к,ч} = \frac{L_{кп}}{2} - 3 \cdot l_{щ}^o = \frac{54,39}{2} - 3 \cdot 8,7 = 1,095 \text{ м,}$$

которое уточняется после расчета радиальных ребер.

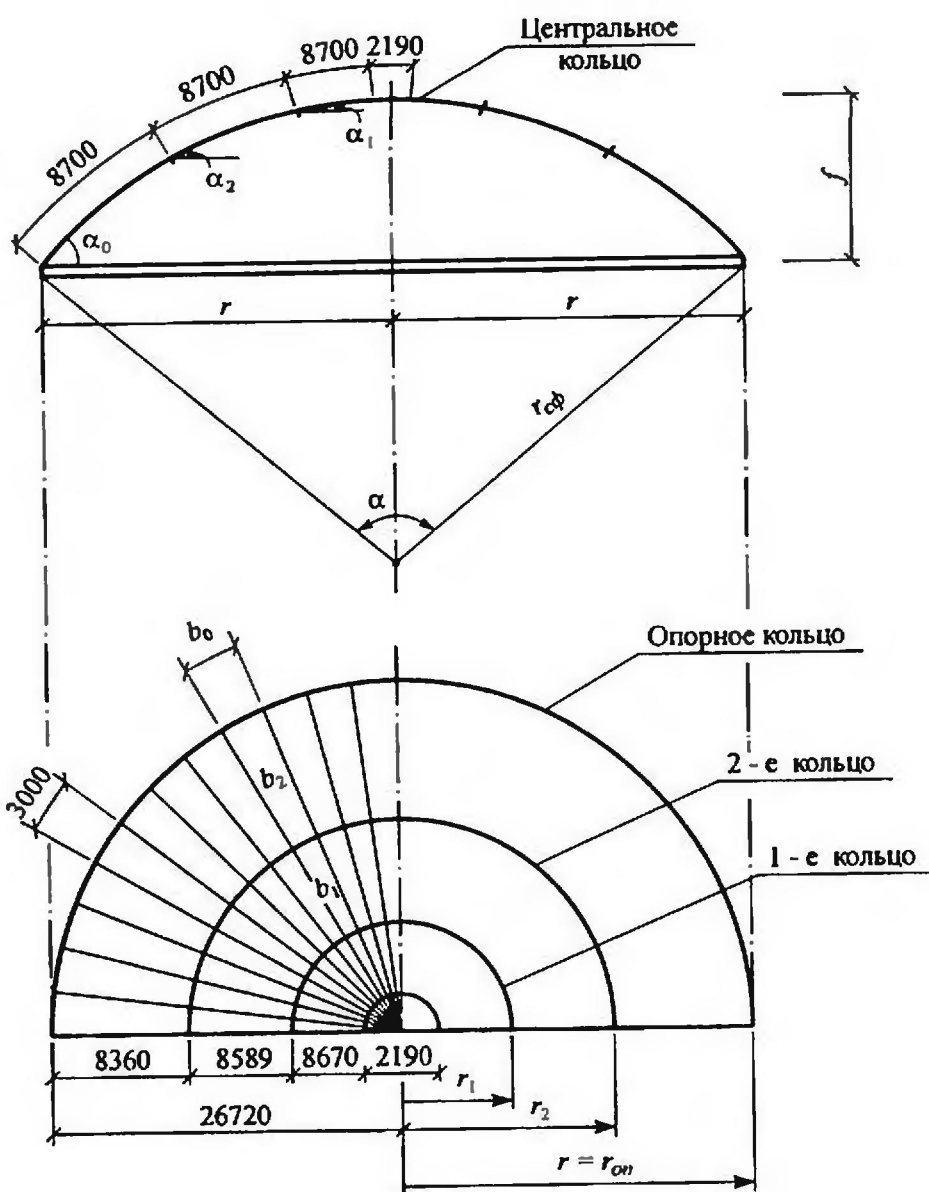


Рис. 3.23. Схема ребристо-кольцевого купола

Определяем число щитов в одном ярусе, исходя из ширины щита по опорному кольцу $b_0 = 3,0 \dots 3,5$ м. Количество щитов в одном ярусе

$$n_{щ} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{3,0} = \frac{2 \cdot 3,14159 \cdot 26,72}{3,0} = 55,96.$$

Примем $n_{щ} = 56$ шт. Рекомендуется, чтобы количество щитов в одном ярусе было кратно четырем.

Купол собирается из трех типов трапецевидных щитов, изготовленных на заводе. Расчетными элементами купола являются:

- радиальные ребра;
- промежуточные кольца;
- опорное кольцо;
- настил.

Ширина щитов:

$$b_0 = 3,0 \text{ м};$$

$$b_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_1}{n_{щ}} = \frac{2 \cdot 3,14159 \cdot \left(8,67 + \frac{2,19}{2}\right)}{56} = 1,096 \text{ м};$$

$$b_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_2}{n_{щ}} = \frac{2 \cdot 3,14159 \cdot \left(8,589 + 8,670 + \frac{2,19}{2}\right)}{56} = 2,056 \text{ м}.$$

3.11.2. Сбор нагрузок на купол (см. п. 3.10.2)

Нагрузки *вертикального* направления определяются по формулам (3.47):

– направленные вниз

$$q = \gamma_{f,щ} \cdot g_{щ} + \psi \cdot (\gamma_{f,вак} \cdot P_{вак}^H + S_g \cdot \mu) =$$

$$= 1,05 \cdot 1,0 + 0,9 \cdot (1,2 \cdot 0,25 + 1,8 \cdot 1,0) = 2,94 \text{ кН/м}^2;$$

– направленные вверх

$$q_1 = \psi \cdot (\gamma_{f,изб} \cdot P_{изб}^H + \gamma_{f,ом} \cdot w_m^{ом}) - 0,9 \cdot g_{щ},$$

где $w_m^{ом}$ – нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на высоте z (до середины стрелки подъема купола) от уровня земли

$$z = H + \frac{f}{2} = 18,0 + \frac{4,45}{2} \approx 20,2 \text{ м}.$$

По табл. 2.4 для местности типа В коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте, имеет величину $\kappa_0 = 0,85$ при $z = 20 \text{ м}$,

$$w_m^{ом} = w_0 \cdot \kappa_0 \cdot c_{e2},$$

где $w_0 = 0,3 \text{ кН/м}^2$ – для II района;

$$c_{e2} = -0,6 \text{ при } \frac{H}{D} = \frac{1}{3} [26];$$

$$w_m^{ом} = 0,3 \cdot 0,85 \cdot 0,6 = 0,153 \text{ кН/м}^2,$$

знак «–» учтен направлением ветровой нагрузки на покрытие.

Имеем

$$q_1 = 0,9 \cdot (1,2 \cdot 2,0 + 1,4 \cdot 0,153) - 0,9 \cdot 1,0 = 1,45 \text{ кН/м}^2.$$

Комбинация нагрузок *горизонтального* направления на верхнюю часть резервуара ($0,4H$):

– нагрузки, вызывающие сжатие опорного кольца купола в виде активного давления ветра и вакуума, определяемые по формуле (3.48):

$$W = 0,4 \cdot H \cdot b_0 \cdot (1,4 \cdot w_m + 1,2 \cdot P_{вак}^H),$$

где $w_m = w_0 \cdot \kappa_0 \cdot c = 0,3 \cdot 0,738 \cdot 0,5 = 0,11 \text{ кН/м}^2$,

$$w_0 = 0,3 \text{ кН/м}^2; c = 0,5;$$

коэффициент κ_0 находится на высоте $z = 0,8 \cdot H = 0,8 \cdot 18,0 = 14,4 \text{ м}$;

$$\kappa_0 = 0,738.$$

$$W = 0,4 \cdot 18,0 \cdot 3,0 \cdot (1,4 \cdot 0,11 + 1,2 \cdot 0,25) = 9,8 \text{ кН};$$

– нагрузки, вызывающие растяжение опорного кольца: ветровой отсос и избыточное давление по формуле (3.49):

$$W_1 = 0,4 \cdot H \cdot b_0 \cdot (1,4 \cdot w_m + 1,2 \cdot P''_{изб}),$$

где $w_m = w_0 \cdot \kappa_0 \cdot c$, $c = 1,0$;

$$w_m = 0,3 \cdot 0,738 \cdot 1,0 = 0,22 \text{ кН/м}^2;$$

$$W_1 = 0,4 \cdot 18,0 \cdot 3,0 \cdot (1,4 \cdot 0,22 + 1,2 \cdot 2,0) = 58,5 \text{ кН}.$$

Вертикальная сосредоточенная нагрузка на узел пересечения радиального ребра с кольцом определяется по формуле (3.50):

для 1-го кольца при $r_1 = 9,765 \text{ м}$:

– направленная вверх

$$V_{1,1} = \frac{q_1 \cdot \pi \cdot r_1^2}{n_{\text{ш}}} = \frac{1,45 \cdot 3,14 \cdot 9,765^2}{56} = 7,75 \text{ кН};$$

– направленная вниз

$$V_1 = \frac{q \cdot \pi \cdot r_1^2}{n_{\text{ш}}} = \frac{2,94 \cdot 3,14 \cdot 9,765^2}{56} = 15,7 \text{ кН};$$

для 2-го кольца при $r_2 = 18,35 \text{ м}$; $r_3 = 26,72$:

– направленная вниз

$$V_2 = \frac{q \cdot \pi \cdot r_2 \cdot (r_3 - r_1)}{n_{\text{ш}}} = \frac{2,94 \cdot 3,14 \cdot 18,35 \cdot (26,72 - 9,77)}{56} = 51,3 \text{ кН};$$

– направленная вверх

$$V_{1,2} = \frac{q_1 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot (r_3 - r_1)}{n_{\text{ш}}} = \frac{1,45 \cdot 3,14 \cdot 18,35 \cdot (26,72 - 9,77)}{56} = 25,3 \text{ кН}.$$

3.11.3. Расчет радиального ребра купола

Наиболее напряженным будет радиальное ребро между опорным и вторым кольцами. Расчетная схема радиального ребра изображена на рис. 3.19.

Найдем углы наклона касательной с осью x в уровнях опорного кольца ($x_1 = 0$) и 2-го кольца ($x_2 = 8,36 \text{ м}$) (см. рис. 3.20) по формуле (3.54):

$$\text{tg } \alpha_0 = \frac{r_{on}}{0,5 \cdot \left(\frac{r_{on}^2}{f} - f \right)} = \frac{26,72}{0,5 \cdot \left(\frac{26,72^2}{4,45} - 4,45 \right)} = 0,3426 ;$$

$$\alpha_0 = 18,9^\circ;$$

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \alpha_2 &= \frac{r_{on} - x_2}{\sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{r_{on}^2}{f} - f \right)^2 + x_2 \cdot (2 \cdot r_{on} - x_2)}} = \\ &= \frac{26,72 - 8,36}{\sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{26,72^2}{4,45} - 4,45 \right)^2 + 8,36 \cdot (2 \cdot 26,72 - 8,36)}} = 0,2257; \\ \alpha_2 &= 12,7^\circ.\end{aligned}$$

Вычислим α_1 в уровне 1-ого кольца при $x_1 = 16,949$ м.

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \alpha_1 &= \frac{r_{on} - x_1}{\sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{r_{on}^2}{f} - f \right)^2 + x_1 \cdot (2 \cdot r_{on} - x_1)}} = \\ &= \frac{26,72 - 16,949}{\sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{26,72^2}{4,45} - 4,45 \right)^2 + 16,949 \cdot (2 \cdot 26,72 - 16,949)}} = 0,118; \\ \alpha_1 &= 6,73^\circ.\end{aligned}$$

Для опорного радиального ребра средний угол наклона касательных

$$\alpha_{cp}^{on} = \frac{\alpha_0 + \alpha_2}{2} = \frac{18,9 + 12,7}{2} = 15,8^\circ;$$

то же для ребра между 2-м и 1-м кольцами

$$\alpha_{cp,2} = \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2} = \frac{12,7 + 6,73}{2} = 9,7^\circ.$$

Интенсивность нагрузки на опорное радиальное ребро:

$$q_{p,1} = q \cdot b_0 = 2,94 \cdot 3,0 = 8,8 \text{ кН/м};$$

$$q_{p,2} = q \cdot b_2 = 2,94 \cdot 2,056 = 6,0 \text{ кН/м}.$$

Продольные сжимающие усилия в опорном ребре:

$$N_{on}^W = \frac{W}{\cos \alpha_0} = \frac{9,8}{0,946} = 10,4 \text{ кН},$$

где W – см. п. 3.11.2;

$$N_{on}^V = \frac{V_2}{\sin \alpha_0} = \frac{51,3}{0,324} = 158,3 \text{ кН};$$

$$N_{on}^q \approx \frac{(q_{p,1} + q_{p,2}) \cdot l_3 \cdot \sin \alpha_{cp}^{on}}{2} = \frac{(8,8 + 6,0) \cdot 8,36 \cdot 0,272}{2} = 16,8 \text{ кН},$$

где $l_3 = 8,36$ м – см. рис. 3.23.

Суммарное продольное сжимающее усилие в опорном ребре определяется по формуле (3.51)

$$N_{on} = \psi \cdot N_{on}^W + N_{on}^V + N_{on}^q = 0,9 \cdot 10,4 + 158,3 + 16,8 = 185 \text{ кН.}$$

Найдем наибольшее значение изгибающего момента в опорном ребре от распределенной нагрузки (рис. 3.24).

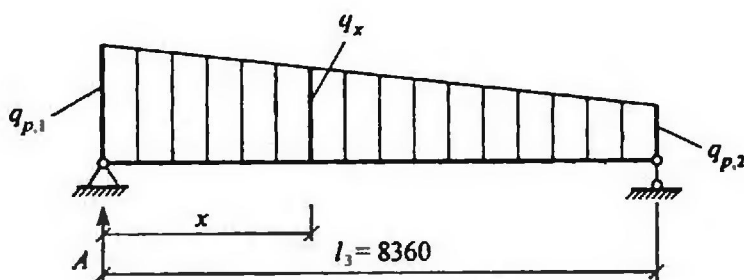


Рис. 3.24. Схема загрузки опорного ребра распределенной нагрузкой

Левая опорная реакция

$$A = l_3 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot q_{p,1} + \frac{1}{6} \cdot q_{p,2} \right) = 8,36 \cdot \left(\frac{8,8}{3} + \frac{6,0}{6} \right) = 33 \text{ кН.}$$

Найдем положение сечения с наибольшим изгибающим моментом по формуле (3.52)

$$x = \frac{q_{p,1} \cdot l_3}{\Delta q} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot A \cdot \Delta q}{q_{p,1}^2 \cdot l_3}} \right) = \frac{8,8 \cdot 8,36}{2,8} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 33 \cdot 2,8}{8,8^2 \cdot 8,36}} \right) = 4,06 \text{ м,}$$

где $\Delta q = q_{p,1} - q_{p,2} = 8,8 - 6,0 = 2,8 \text{ кН/м.}$

Максимальное значение изгибающего момента в этом сечении

$$\begin{aligned} M_{\max}^q &= A \cdot x - \frac{1}{2} \cdot q_{p,1} \cdot x \cdot \frac{2}{3} \cdot x - \frac{1}{2} \cdot q_x \cdot x \cdot \frac{1}{3} \cdot x = \\ &= 33,0 \cdot 4,06 - \frac{1}{2} \cdot 8,8 \cdot 4,06 \cdot \frac{2}{3} \cdot 4,06 - \frac{1}{2} \cdot 7,44 \cdot 4,06 \cdot \frac{1}{3} \cdot 4,06 = 65,2 \text{ кН·м,} \end{aligned}$$

где $q_x = q_{p,2} + \frac{\Delta q (l_3 - x)}{l_3} = 6,0 + \frac{2,8 \cdot (8,36 - 4,06)}{8,36} = 7,44 \text{ кН/м.}$

Радиальные ребра конструируем из двух прокатных швеллеров (рис. 3.25) из стали марки ВСт3пс6-1 ($R_y = 24 \text{ кН/см}^2$).

Ребро работает на внецентренное сжатие.

Считаем, что настил приваривается к радиальным и поперечным ребрам щитов, тем самым обеспечивается устойчивость ребра. Поэтому радиальное ребро будем рассчитывать только на прочность.

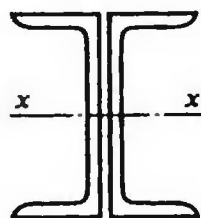


Рис. 3.25. Сечение радиального ребра

Высоту сечения ребра примем из условия $h_p \approx l_3/40 = 836/40 = 20,9$ см. Принимаем ребро в виде двух швеллеров №22 ($A_{шв} = 26,7$ см²; $W_x = 192$ см³).

$$\sigma = \frac{N_{on}}{2A_{шв}} + \frac{M_{\max}^q}{2W_x} = \frac{185,0}{2 \cdot 26,7} + \frac{65,2 \cdot 10^2}{2 \cdot 192,0} = 20,44 \text{ кН/см}^2 < \\ < \gamma_c \cdot R_y = 1,0 \cdot 24,0 = 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Проверим принятое сечение радиального ребра на другую комбинацию нагрузок (q_1 и W_1), вызывающих растяжение.

Продольные растягивающие усилия в ребре:

$$N_{on}^{W_1} = \frac{W_1}{\cos \alpha_0} = \frac{58,5}{0,946} = 61,8 \text{ кН};$$

$$N_{on}^{V_1} = \frac{V_{1,2}}{\sin \alpha_0} = \frac{25,3}{0,324} = 78,1 \text{ кН}.$$

Распределенные нагрузки:

$$q_{p,1}^{\uparrow} = q_1 \cdot b_0 = 1,45 \cdot 3,0 = 4,35 \text{ кН/м};$$

$$q_{p,2}^{\uparrow} = q_1 \cdot b_2 = 1,45 \cdot 2,056 = 2,98 \text{ кН/м};$$

$$N_{on}^{q_1} = \frac{(q_{p,1}^{\uparrow} + q_{p,2}^{\uparrow}) \cdot l_3}{2} \sin \alpha_{cp}^{on} = \frac{(4,35 + 2,98) \cdot 8,36}{2} \cdot 0,272 = 8,3 \text{ кН}.$$

Суммарное продольное растягивающее усилие в ребре определяется по формуле (3.51)

$$N_{on}^+ = \psi \cdot N_{on}^{W_1} + N_{on}^{V_1} + N_{on}^{q_1} = \\ = 0,9 \cdot 61,8 + 78,1 + 8,3 = 142,0 \text{ кН} < N_{on} = 148 \text{ кН}.$$

Поскольку интенсивность распределенной нагрузки направленной вверх, меньше интенсивности нагрузки, направленной вниз, то проверку на прочность ребра по растягивающим усилиям проводить не следует.

Уточним радиус центрального кольца $r_{к,у}$ (рис. 3.10) из условия закрепления в нем радиальных ребер щитов из двух швеллеров №22 ($b = 82$ мм). Учитывая, что ширина двух полок швеллера $2 \cdot 82 = 164$ мм; толщина промежуточного ребра $t_p = 10$ мм; зазор – 5 мм, ширина опирания ребра составит $b_{ук} = 164 + 10 + 5 \approx 180$ мм. Тогда радиус центрального кольца

$$r_{к,у} = \frac{n_{щ} \cdot b_{ук}}{2 \cdot \pi} = \frac{56 \cdot 0,18}{2 \cdot 3,14159} = 1,604 \text{ м}.$$

Длина щита верхнего яруса купола уменьшится и составит:

$$l_1 = 8,700 + \frac{2,190}{2} - 1,604 = 7,923 \text{ м}.$$

Радиальные ребра вышележащих ярусов щитов испытывают меньшие нагрузки: V_i и q_p . Поэтому можно оставить сечение радиальных ребер постоянным из двух швеллеров №22.

3.11.4. Расчет кольцевых элементов купола (см. п. 3.10.4)

а) Опорное кольцо

Распор, передаваемый на опорное кольцо со стороны радиального ребра, определяется по формуле (3.55)

$$P = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot q \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0}{n_{\text{ш}}},$$

где $\operatorname{ctg} \alpha_0 = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_0}$; $\operatorname{tg} \alpha_0 = 0,3426$ (см. п. 3.11.3);

$$P = \frac{3,14 \cdot 26,72^2 \cdot 2,94}{56 \cdot 0,3426} = 344 \text{ кН} - \text{вызывает растяжение в опорном кольце};$$

$$P_1 = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot q_1 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0}{n_{\text{ш}}} = \frac{3,14 \cdot 26,72^2 \cdot 1,45}{56 \cdot 0,3426} = 169 \text{ кН} - \text{сжимает опорное кольцо (см. рис. 3.21).}$$

$$q = 2,94 \text{ кН/м}^2, \quad q_1 = 1,45 \text{ кН/м}^2 \text{ (см. п. 3.11.2).}$$

Изгибающие моменты и продольные усилия вызываемые распорами, определяются по формулам (3.56), (3.57) и (3.58).

При нагрузке сверху вниз q на купол:

– момент под радиальным ребром

$$M_{\max} = -\frac{P \cdot r}{2} \left(\frac{n_{\text{ш}}}{\pi} - \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n_{\text{ш}}} \right) = -\frac{344 \cdot 26,72}{2} \cdot \left(\frac{56}{3,14159} - \operatorname{ctg} \frac{180^\circ}{56} \right) = -86,1 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

– момент между радиальными ребрами

$$M_{\text{ср}} = \frac{P \cdot r}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\pi}{n_{\text{ш}}}} - \frac{n_{\text{ш}}}{\pi} \right) = \frac{344 \cdot 26,72}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{56}} - \frac{56}{3,14159} \right) = 43,5 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Следует заметить, что в отношении $n_{\text{ш}}/\pi$ необходимо применять более точное значение $\pi = 3,14159$;

– продольное усилие (растягивающее)

$$N_{\kappa} = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\pi}{n_{\text{ш}}}} = \frac{344}{2 \cdot \sin \frac{180^\circ}{56}} = 3072 \text{ кН}.$$

При нагрузке q_1 снизу вверх на купол:

– момент под радиальным ребром

$$\overline{M}_{\max} = -M_{\max} \frac{P_1}{P} = 86,1 \cdot \frac{169}{344} = 42,3 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

– момент между радиальными ребрами

$$\overline{M}_{cp} = -M_{cp} \frac{P_1}{P} = -43,5 \cdot \frac{169}{344} = -21,4 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

– продольное сжимающее усилие

$$\overline{N}_\kappa = -N_\kappa \frac{P_1}{P} = -3072 \cdot \frac{169}{344} = -1509 \text{ кН}.$$

Дополнительные продольные усилия и изгибающие моменты в опорном кольце:

– от избыточного давления на $0,4H$ стенки

$$N_{\kappa, \text{изб}} = 0,4 \cdot H \cdot \gamma_{f, \text{изб}} \cdot P_{\text{изб}}^H \cdot r = 0,4 \cdot 18,0 \cdot 1,2 \cdot 2,0 \cdot 26,72 = 462 \text{ кН};$$

– от вакуума на $0,4H$ стенки

$$N_{\kappa, \text{вак}} = -0,4 \cdot H \cdot \gamma_{f, \text{вак}} \cdot P_{\text{вак}}^H \cdot r = -0,4 \cdot 18,0 \cdot 1,2 \cdot 0,25 \cdot 26,72 = -58 \text{ кН};$$

– от ветровой нагрузки на $0,4H$ стенки по формуле (3.59)

$$N_{\kappa, \sigma} = -0,4 \cdot H \cdot \gamma_{f, \sigma} \cdot c_{e1} \cdot w_0 \cdot \kappa_0 \cdot r \cdot \sin 36^\circ,$$

$$\text{где } \gamma_{f, \sigma} = 1,4; c_{e1} = 0,6; w_0 = 0,3 \text{ кН/м}^2; \sin 36^\circ = 0,588.$$

Коэффициент κ_0 следует определять для середины $0,4H$ стенки, т.е. на высоте

$$z = H - \frac{0,4H}{2} = 0,8H = 0,8 \cdot 18,0 = 14,4 \text{ м}.$$

$$\kappa_0 = 0,738 \text{ при } z = 14,4 \text{ м}.$$

В результате подстановки имеем

$$N_{\kappa, \sigma} = -0,4 \cdot 18,0 \cdot 1,4 \cdot 0,6 \cdot 0,3 \cdot 0,738 \cdot 26,72 \cdot 0,588 = -21 \text{ кН} - \text{сжатие}.$$

По формуле (3.63)

$$N_{\kappa, \sigma}^+ = 0,4 \cdot H \cdot \gamma_{f, \sigma} \cdot c'_{e1} \cdot w_0 \cdot \kappa_0 \cdot r \cdot \sin 45^\circ,$$

$$\text{где } c'_{e1} = 1,0 \text{ (см. рис. 3.22); } \sin 45^\circ = 0,707.$$

Имеем

$$N_{\kappa, \sigma}^+ = 0,4 \cdot 18,0 \cdot 1,4 \cdot 1,0 \cdot 0,3 \cdot 0,738 \cdot 26,72 \cdot 0,707 = 42 \text{ кН} - \text{растяжение}.$$

Изгибающие моменты по формулам (3.62) и (3.63):

$$\begin{aligned} M_{\kappa, \sigma} &= \mp 0,14 \cdot H \cdot r^2 \cdot \gamma_{f, \sigma} \cdot w_0 \cdot \kappa_0 = \\ &= \mp 0,14 \cdot 18,0 \cdot 26,72^2 \cdot 1,4 \cdot 0,3 \cdot 0,738 = \mp 558 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Усилия в кольце от ветрового отсоса на покрытие резервуара

$$q^{om} = \psi \cdot \gamma_{f,om} \cdot w_m^{om} = \psi \cdot \gamma_{f,om} \cdot w_0 \cdot \kappa_0 \cdot c_{e_2},$$

где $\psi = 0,9$ – коэффициент сочетания нагрузок;

$$\gamma_{f,om} = 1,4; w_0 = 0,3 \text{ кН/м}^2;$$

$$\kappa_0 = 0,85 \text{ и } c_{e_2} = -0,6 \text{ – см. п. 3.11.2;}$$

$$q^{om} = 0,9 \cdot 1,4 \cdot 0,3 \cdot 0,85 \cdot (-0,6) = -0,193 \text{ кН/м}^2.$$

Распор от ветрового отсоса, передаваемый через радиальные ребра

$$P^{om} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot q^{om}}{n_{\text{щ}}} \cdot \text{ctg } \alpha_0 = \frac{3,14 \cdot 26,72^2 \cdot (-0,193)}{56 \cdot 0,3426} = -22,6 \text{ кН},$$

$$\text{где } \text{ctg } \alpha_0 = \frac{1}{\text{tg } \alpha_0} = \frac{1}{0,3426}; \alpha_0 \text{ – см. п. 3.11.3.}$$

Изгибающие моменты в опорном кольце от ветровых распоров P^{om} :

$$M_{\text{max}}^{om} = -\frac{P^{om} \cdot r}{2} \left(\frac{n_{\text{щ}}}{\pi} - \text{ctg } \frac{\pi}{n_{\text{щ}}} \right) = \frac{22,6 \cdot 26,72}{2} \cdot \left(\frac{56}{3,14159} - \text{ctg } \frac{180^\circ}{56} \right) = 5,9 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{cp}}^{om} = \frac{P^{om} \cdot r}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\pi}{n_{\text{щ}}}} - \frac{n_{\text{щ}}}{\pi} \right) = \frac{-22,6 \cdot 26,72}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{56}} - \frac{56}{3,14159} \right) = -2,9 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Продольное усилие

$$N_{\kappa}^{om} = \frac{P^{om}}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\pi}{n_{\text{щ}}}} = -\frac{22,6}{2 \cdot \sin \frac{180^\circ}{56}} = -202 \text{ кН}.$$

Результаты определения усилий в опорном кольце от нагрузок приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Усилия в сечениях опорного кольца

Вертикальные нагрузки на покрытие – вниз q			Вакуум на 0,4H стенки	Вертикальные нагрузки на покрытие – вверх q_1		
1			2	3		
$M_{\text{max}},$ кН·м	$M_{\text{cp}},$ кН·м	$N_{\kappa},$ кН	$N_{\kappa, \text{вак}},$ кН	$\bar{M}_{\text{max}},$ кН·м	$\bar{M}_{\text{cp}},$ кН·м	$\bar{N}_{\kappa},$ кН
-86,1	43,5	3072	-58	42,3	-21,4	-1509

Избыточное давление на 0,4H стенки	Ветер на 0,4H стенки			Ветровой отсос на покрытие		
4	5			6		
$N_{\kappa, изб},$ кН	$M_{\kappa, в},$ кН·м	$N_{\kappa, в}^-,$ кН	$N_{\kappa, в}^+,$ кН	$M_{\max}^{от},$ кН·м	$M_{ср}^{от},$ кН·м	$N_{\kappa}^{от},$ кН
462	± 558	- 21	42	5,9	- 2,9	- 202

При составлении таблицы расчетных сочетаний усилий в сечениях опорного кольца необходимо учитывать следующее:

1) нагрузки 1 следует суммировать с нагрузкой 2, так как в составе q имеется вакуум на покрытие;

2) нагрузки 3 суммируют с нагрузкой 4, поскольку в состав q_1 входит избыточное давление на покрытие, и с нагрузкой 5 (q_1 включает также и ветровой отсос);

3) если учитывается ветровая нагрузка на 0,4H стенки, то надо учитывать и нагрузку 6 (ветровой отсос).

Проверка сечения опорного кольца на прочность должна проводиться по отмеченным расчетным усилиям (табл. 3.5). Сечение опорного кольца принимаем с размерами, указанными на рис. 3.26.

Таблица 3.5

Номера загрузки и расчетные усилия в сечениях опорного кольца

Усилия	Нагрузки (из табл. 3.4)		
	1 + 2	3 + 4 + 5 + 6	1 + 2 + 5 + 6
$M_{\max}^+, \text{ кН·м}$	43,5	606,0	607,0
$M_{\max}^-, \text{ кН·м}$	- 86,1	- 582,0	- 647,0
$N_{соотв}, \text{ кН}$	3072	- 1207	2854

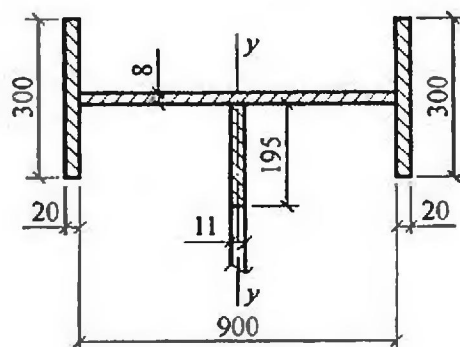


Рис. 3.26. Сечение опорного кольца

Размеры, указанные на рис. 3.26 получены способом последовательных приближений. Для опорного кольца принята сталь марки ВСтЗпс6-1 ($R_y = 24 \text{ кН/см}^2$ при $t \leq 20 \text{ мм}$).

В сечении опорного кольца необходимо учесть часть стенки резервуара высотой

$$0,65 \sqrt{\frac{E}{R_y}} = 0,65 \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^4}{24,0}} = 19,45 \text{ см} = 195 \text{ мм}.$$

При этом площадь сечения кольца составляет

$$A = 90,0 \cdot 0,8 + 2 \cdot 2,0 \cdot 30,0 + 19,5 \cdot 1,1 = 213,5 \text{ см}^2.$$

Момент инерции сечения кольца относительно вертикальной оси у–у

$$J_y = \frac{0,8 \cdot 90,0^3}{12} + 2 \cdot 2,0 \cdot 30,0 \cdot \left(\frac{90,0}{2} + \frac{2,0}{2} \right)^2 = 302520 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления

$$W_y = \frac{302520}{\frac{90}{2} + 2,0} = 6437 \text{ см}^3.$$

Проверка сечения на прочность осуществляется по формуле

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} \leq \gamma_c \cdot R_y,$$

где $N = 2854 \text{ кН}$; $M_y = 647 \text{ кН} \cdot \text{м}$ – см. табл. 3.5.

Положительное значение момента M_y принято потому, что для симметричного сечения противоположные волокна будут иметь равные по величине и обратные по знаку нормальные напряжения. При положительном моменте нормальные напряжения от продольной силы и момента будут одинакового знака:

$$\sigma = \frac{2854,0}{213,5} + \frac{647,0 \cdot 10^2}{6437} = 23,42 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2 -$$

прочность опорного кольца обеспечена.

Устойчивость кольца в своей плоскости будет обеспечена за счет опирающихся на него щитов и листов кровли (настила).

б) Промежуточное кольцо

Рассмотрим расчет кольца, смежного с опорным (рис. 3.27).

Продольное усилие в элементе 2-го кольца определяется по формуле (3.64):

$$N_{\kappa,2} = \frac{1}{2 \cdot \sin \frac{180^\circ}{56}} (N_2 \cdot \cos \alpha_2 - N_1 \cdot \cos \alpha_1),$$

где $\alpha_2 = 12,7^\circ$; $\alpha_1 = 6,73^\circ$ – см. п. 3.11.3;

$$N_2 = N_2^V = \frac{V_2}{\sin \alpha_2}; \quad N_1 = N_1^V = \frac{V_1}{\sin \alpha_1} \text{ – см. п. 3.10.3,}$$

$$V_2 = \frac{q \cdot \pi \cdot r_2^2}{n_{\text{ш}}}; \quad V_1 = \frac{q \cdot \pi \cdot r_1^2}{n_{\text{ш}}} \text{ – см. формулу (3.50),}$$

$$q = 2,94 \text{ кН/м}^2 \text{ – см. п. 3.11.2;}$$

$$r_1 = 8,670 + 2,190/2 = 9,765 \text{ м;}$$

$$r_2 = 8,589 + 8,670 + 2,190/2 = 18,354 \text{ м – см. рис. 3.23.}$$

Подставляя эти значения, имеем:

$$V_1 = \frac{2,94 \cdot 3,14 \cdot 9,765^2}{56} = 15,7 \text{ кН}; \quad V_2 = \frac{2,94 \cdot 3,14 \cdot 18,354^2}{56} = 55,5 \text{ кН};$$

$$N_1 = \frac{V_1}{\sin \alpha_1} = \frac{15,7}{\sin 6,73^\circ} = 134 \text{ кН}; \quad N_2 = \frac{V_2}{\sin \alpha_2} = \frac{55,5}{\sin 12,7^\circ} = 252 \text{ кН};$$

$$N_{\kappa,2} = \frac{1}{2 \cdot \sin \frac{180^\circ}{56}} (252 \cdot \cos 12,7^\circ - 134 \cdot \cos 6,73^\circ) = 1007 \text{ кН}; \quad - \text{сжатие (см.}$$

рис. 3.27).

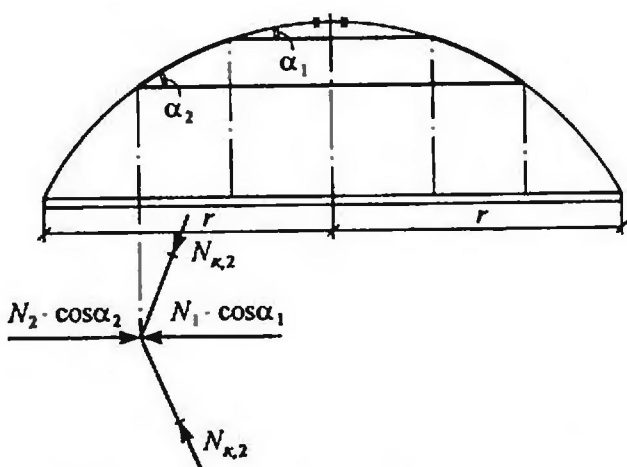


Рис. 3.27. К расчету промежуточного 2-го кольца

Принимая условие, что настил приваривается к кольцам, определяем требуемое сечение кольца из условия прочности по формуле

$$A_{mp} = \frac{N_{\kappa,2}}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{1007}{1,0 \cdot 24,0} = 42,0 \text{ см}^2.$$

Если предположить, что настил не приварен к кольцам, то сечение кольца определяется из условия устойчивости по формуле (3.65)

$$J_{\kappa,mp} = \frac{1,3 \cdot N_{\kappa,2} \cdot r_2^2}{3 \cdot E} = \frac{1,3 \cdot 1007 \cdot 1835,4^2}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^4} = 7,14 \cdot 10^4 \text{ см}^4.$$

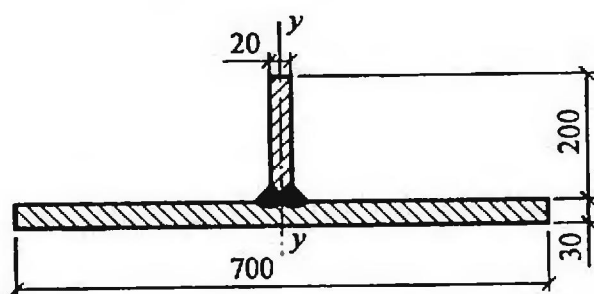


Рис. 3.28. Сечение промежуточного 2-го кольца

Законструируем кольцо по второму варианту, когда настил не приварен к кольцам (рис. 3.28). Ширину кольца можно определить по требуемому моменту инерции $J_{\kappa,mp}$, задавшись толщиной.

Момент инерции сечения кольца относительно вертикальной оси $y-y$:

$$J_y = \frac{3 \cdot 70^3}{12} = 8,57 \cdot 10^4 \text{ см}^4 > J_{\kappa,mp} -$$

сечение кольца достаточно для обеспечения его устойчивости.

Площадь сечения кольца

$$A_{\kappa} = 3 \cdot 70 + 2 \cdot 20 = 250 \text{ см}^2,$$

что значительно больше требуемого сечения кольца из условия прочности, равного $42,0 \text{ см}^2$. Поэтому целесообразно настил приваривать к кольцам, если это возможно по конструктивным соображениям.

в) Центральное кольцо (см. рис. 3.10)

Радиус центрального кольца определен в конце п. 3.11.3 и составляет $r_{к,ч} = 1,604 \text{ м}$.

Центральное кольцо воспринимает распоры со стороны радиальных ребер от вертикальных нагрузок (рис. 3.29).

Распор радиального ребра

$$P_p = N_1 \cdot \cos \alpha_1,$$

где $N_1 = 134 \text{ кН}$;

$\alpha_1 = 6,73^\circ$ – см. п. 3.11.3.

$$P_p = 134 \cdot \cos 6,73^\circ = 133 \text{ кН}.$$

Поскольку радиальные ребра расположены часто по периметру центрального кольца, то приведем нагрузку на кольцо к равномерно распределенной по оси кольца:

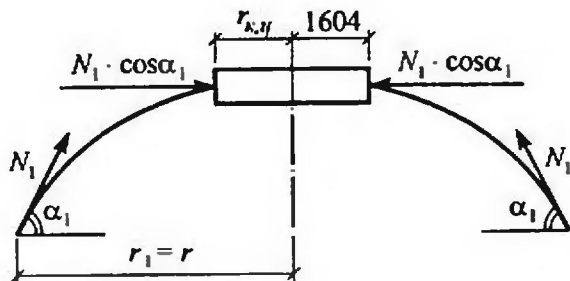


Рис. 3.29. К расчету центрального кольца

$$q_{ц} = \frac{P_p}{b_{цк}} = \frac{133}{18} = 7,4 \text{ кН/см},$$

где $b_{цк} = 180 \text{ мм}$ – см. п. 3.11.3.

Продольное сжимающее усилие в центральном кольце определяется по формуле

$$N_{к,ч} = q_{ц} \cdot r_{к,ч} = 7,4 \cdot 160,4 = 1187 \text{ кН}.$$

Настил приваривается к центральному кольцу, что обеспечивает его устойчивость. Поэтому требуемое сечение кольца установим по прочности:

$$A_{тр,ч} = \frac{N_{к,ч}}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{1187}{0,9 \cdot 24,0} = 54,95 \text{ см}^2.$$

Сечение центрального кольца конструируем в виде сварного двутавра (рис. 3.30).

Высота сечения стенки двутавра (205 мм) принимается равной высоте прокатного швеллера (радиального ребра) и плюс 5 мм на зазор. Фактическое сечение центрального кольца

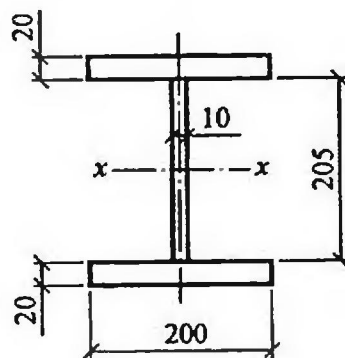


Рис. 3.30. Сечение центрального кольца

$$A_{ф} = 1,0 \cdot 20,5 + 2 \cdot 2 \cdot 20 = 100,5 \text{ см}^2 > A_{тр,ч}.$$

Принятое сечение центрального кольца завышено с учетом того, что при неравномерной нагрузке на купол кольцо дополнительно будет испытывать кручение.

3.12. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ПЛАВАЮЩЕЙ КРЫШИ

Один из вариантов конструктивного решения плавающей крыши изображен на рис. 1.3, на котором представлена крыша в виде однослойной гибкой мембраны в средней части и кольцевых коробов на периферийной части крыши для обеспечения ее плавучести.

Для предотвращения волнообразных деформаций тонкой мембраны (толщиной 4...5 мм) крыши в крупных резервуарах диаметром 50...90 м устанавливают от 16 до 24 радиальных коробчатых балок, приваренных с одной стороны к кольцевым коробам, а с другой стороны – к центральному понтону диаметром 1/8...1/10 радиуса резервуара. Для большей жесткости крыши нашли применение и кольцевые ребра из стальных полос. К мембране и коробам по концентрическим окружностям через патрубки присоединяются опорные стойки из труб диаметром 60...100 мм и длиной 1,8...1,9 м. К днищу привариваются квадратные опорные плиты под стойки размером 400×10...800×10 мм.

Для предотвращения радиальных и круговых перемещений плавающей крыши устанавливают две направляющие из труб диаметром 400...1000 мм.

Толщина обшивки коробов принимается конструктивно и равна 4...5 мм. Обшивка короба приваривается к каркасу из прокатных уголков.

Расчетным размером является высота расположения ватерлинии от днища коробов h_g . Ватерлиния – линия на внешней обшивке коробов плавающей крыши, показывающая предельную глубину погружения их в жидкость (см. рис. 1.3).

Положение ватерлинии определяется по формуле:

$$h_g = \frac{G_{кр} + G_{об} + G_{прз} + G_{кон} + G_{сн} + q_{давл} \cdot A_{кнт} \cdot f}{\pi \cdot r_n^2 \cdot \rho_{\min}}, \quad (3.67)$$

где $G_{кр} = g_{эл} \cdot V \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}$ – собственный вес крыши,

$g_{эл}$ – определяется по табл. П2;

$G_{об} = 100...200$ кН – собственный вес оборудования;

$G_{прз}$ – вес пригруза, $G_{прз} \approx 0,07 \cdot V$, кН;

V – объем резервуара, m^3 ;

$G_{кон}$ – нагрузка от конденсата, $G_{кон} = 1,2 \cdot 0,3 \cdot \pi \cdot r_n^2$, кН;

r_n – радиус крыши, м; $r_n = r - 200$ мм;

$$G_{сн} = S_g \cdot \mu \cdot \pi \cdot r_n^2;$$

$q_{давл} \approx 5$ кПа – давление прижима затвора на стенку резервуара;

$A_{кнт} = 2\pi \cdot r \cdot b_{нр}$ – площадь поверхности контакта затвора со стенкой,

$b_{нр} = 0,2...0,3$ м;

$f = 0,15$ – коэффициент трения;

$\rho_{\min} \approx 7$ кН/м³ [24].

Высота коробов принимается

$$h_k = (1,5 \dots 2,0) \cdot h_g \quad (3.68)$$

Мембрана приваривается к внутренней обшивке коробов на высоте:

$$h_m \approx \frac{G_{кр} + G_{об} + G_{прз} + G_{кон}}{2 \cdot \pi \cdot r_n^2 \cdot \rho_{min}} \quad (3.69)$$

Стенка резервуара с плавающей крышей должна проверяться на устойчивость от воздействия ветровых нагрузок по формуле [24]

$$\sigma_2 = 0,9 \cdot w_0 \cdot \kappa_0 \cdot (1,4 \cdot c_i + 0,5) \cdot \frac{r}{t_{min, p}},$$

где c_i – аэродинамический коэффициент, определяемый в зависимости от отношения высоты резервуара к его диаметру [26].

В резервуарах с плавающей крышей верхний пояс стенки усиливается кольцом жесткости, сечение которого подбирается из условия действия в нем максимального изгибающего момента M , вычисляемого по формуле [24]

$$M = 0,0186 \cdot \gamma_f \cdot w_m \cdot r^2 \cdot H, \quad (3.70)$$

где $\gamma_f = 1,4$;

w_m – нормативное значение ветрового давления, определяемое по формуле (2.39);

r и H – соответственно, радиус и высота резервуара.

Если верхнее кольцо жесткости выполнено из листа и приварено к стенке (рис. 3.31) сплошным угловым швом, в момент инерции кольца включаются части оболочки стенки шириной до 15 расчетных толщин листа пояса вверх и вниз от места сварки.

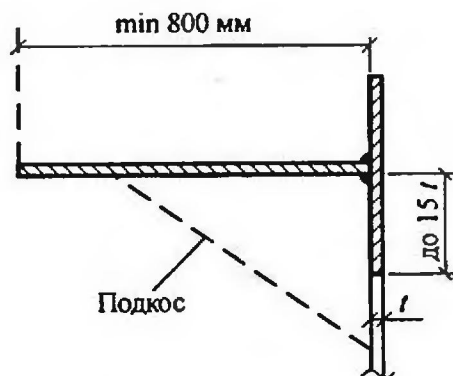


Рис. 3.31. Схема верхнего кольца жесткости стенки при отсутствии крыши

3.13. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПЛАВАЮЩЕЙ КРЫШИ

Требуется определить размеры элементов плавающей крыши резервуара емкостью $V = 50000 \text{ м}^3$, диаметром 60,7 м для III – снегового района.

Примем конструкцию плавающей крыши в виде однослойной гибкой мембраны толщиной 5 мм в средней части и кольцевых коробов на периферийной части крыши для обеспечения ее плавучести (см. рис. 1.3).

Радиус плавающей крыши

$$r_n = \frac{60,7}{2} - 0,2 = 30,15 \text{ м.}$$

Назначим ширину кольцевого короба равной 2,5 м, что соответствует примерно $1/12$ от r_n . Кольцевой короб представляет собой каркас из прокатных уголков, обшитый листовой сталью толщиной 5 мм (рис. 3.32).

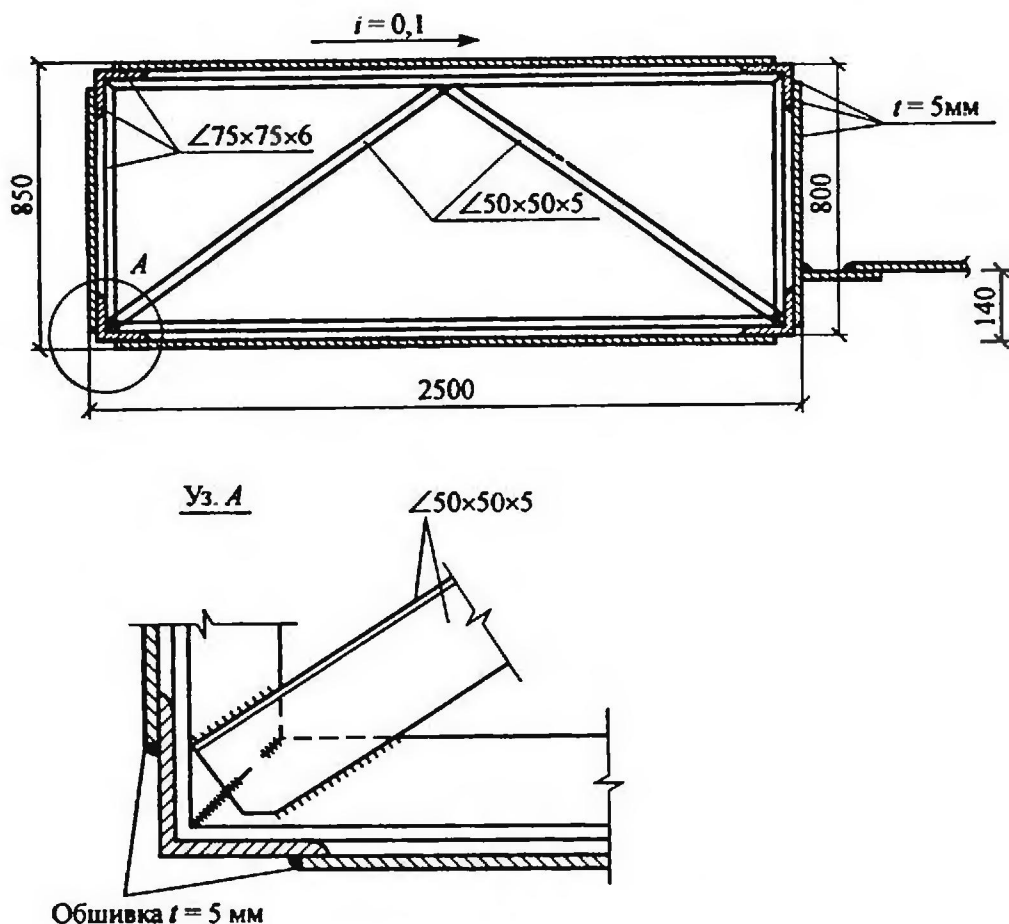


Рис. 3.32. Сечение короба плавающей крыши

Положение ватерлинии определяется по формуле (3.67), предварительно вычислив входящие в нее величины:

– собственный вес крыши

$$G_{кр} = g_{эл} \cdot V \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 4,0 \cdot 50000,0 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 1962 \text{ кН},$$

где $g_{эл} = 4,0 \text{ кг/м}^3$ – см. табл. П2;

– собственный вес оборудования принимается равным

$$G_{об} = 200 \text{ кН};$$

– вес пригруза

$$G_{прз} = 0,07 \cdot V = 0,07 \cdot 50000 = 3500 \text{ кН};$$

– нагрузка от конденсата

$$G_{кон} = 1,2 \cdot 0,3 \cdot \pi \cdot r_n^2 = 1,2 \cdot 0,3 \cdot 3,14 \cdot 30,15^2 = 34 \text{ кН};$$

– нагрузка от снега

$$G_{сн} = S_g \cdot \mu \cdot \pi \cdot r_n^2 = 1,8 \cdot 1,0 \cdot 3,14 \cdot 30,15^2 = 5138 \text{ кН};$$

– сила трения прижима о стенку резервуара

$$G_{np} = q_{давл} \cdot A_{кнт} \cdot f,$$

где $q_{давл} = 5 \text{ кН/м}^2$ – давление прижима затвора на стенку;

$A_{кнт} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot b_{np}$ – площадь поверхности контакта затвора со стенкой,

$b_{np} = 0,3 \text{ м};$

$r = 30,35 \text{ м};$

$f = 0,15$ – коэффициент трения;

$$G_{np} = 5,0 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 30,35 \cdot 0,3 \cdot 0,15 = 43 \text{ кН};$$

– минимальная плотность хранимой в резервуаре жидкости

$$\rho_{\min} = 700 \text{ кг/м}^3 \approx 7 \text{ кН/м}^3.$$

Положение ватерлинии

$$h_g = \frac{G_{кр} + G_{об} + G_{np2} + G_{кон} + G_{сн} + G_{np}}{\pi \cdot r_n^2 \cdot \rho_{\min}} =$$
$$= \frac{1962 + 200 + 3500 + 34 + 5138 + 43}{3,14 \cdot 30,15^2 \cdot 7,0} = 0,544 \text{ м}.$$

Высота коробов принимается равной

$$h_k \approx 1,5 \cdot h_g = 1,5 \cdot 0,544 = 0,82 \text{ м}.$$

Примем $h_k = 850 \text{ мм}.$

Центральная часть днища (мембрана) должна иметь уклон к центру, равный 1 : 40, и привариваться к внутренней стенке коробов на высоте

$$h_m \approx \frac{G_{кр} + G_{об} + G_{np2}}{2,0 \cdot \pi \cdot r_n^2 \cdot \rho_{\min}} = \frac{1962 + 200 + 3500}{2,0 \cdot 3,14 \cdot 30,15^2 \cdot 7,0} = 0,14 \text{ м}.$$

Сечение короба показано на рис. 3.32. Каркас короба состоит из четырех прокатных уголков $\angle 75 \times 75 \times 6$, располагаемых по углам сечения короба, и сквозных диафрагм также из прокатных уголков, которые располагаются в радиальных плоскостях через 3,38 м по внешней дуге окружности короба. Короб разделен на сектора вертикальными стенками в целях безопасности затопления его при нарушении герметичности сварных швов.

3.14. ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА

Эксплуатационное оборудование резервуара состоит из арматуры (устройств для налива, замера и выпуска жидкости), предохранительных клапа-

нов и приспособлений для очистки и осмотра (лестниц, светового и замерного люков, лазов).

В стационарной крыше или стенке резервуара с понтоном должны быть предусмотрены вентиляционные патрубки (отверстия), равномерно расположенные по периметру на расстоянии не более 10 м друг от друга (но не менее двух), и один патрубок в центре. Общая площадь патрубков (отверстий) должна быть не менее $0,06 \text{ м}^2$ на 1 м диаметра резервуара. Конструктивное исполнение люков и патрубков на крыше должно соответствовать рис. 3.33 и табл. 3.6. Для осмотра внутреннего пространства резервуара каждый резервуар должен быть снабжен не менее чем двумя люками (световыми) на крыше.

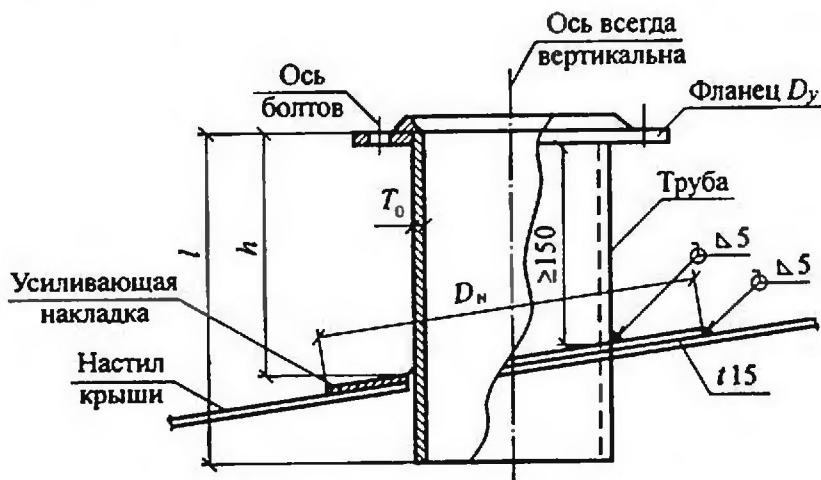


Рис. 3.33. Патрубки на крыше

Таблица 3.6

Размеры патрубков

Условный проход патрубка D_y , мм	Толщина обечайки патрубка T_o , мм	Диаметр усиливающего листа D_m , мм
100	5	220
150	5	320
200	5	440
250	6	550
300	6	650
350	6	760
400	6	860
500	6	1060

Для проникновения внутрь резервуара при его монтаже, осмотре и проведении ремонтных работ резервуар должен иметь не менее двух люков в первом поясе стенки, а резервуары с плавающей крышей дополнительно должны иметь не менее одного люка, расположенного на высоте, обеспечи-

вающей выход на плавающую крышу (рис. 3.34). Люки-лазы должны иметь условный проход не менее 600 мм; параметры люков-лазов приведены в табл. 3.7.

Наличие различного рода врезок в стенке резервуара нарушает сплошность оболочки, вызывая концентрацию напряжений вокруг врезок. Необходимо применять такие конструкции патрубков и люков-лазов, которые обеспечивают прочность и герметичность врезок, эквивалентные стенке резервуара.

Все отверстия в стенке должны быть усилены накладками (воротника-ми), расположенными по периметру отверстий.

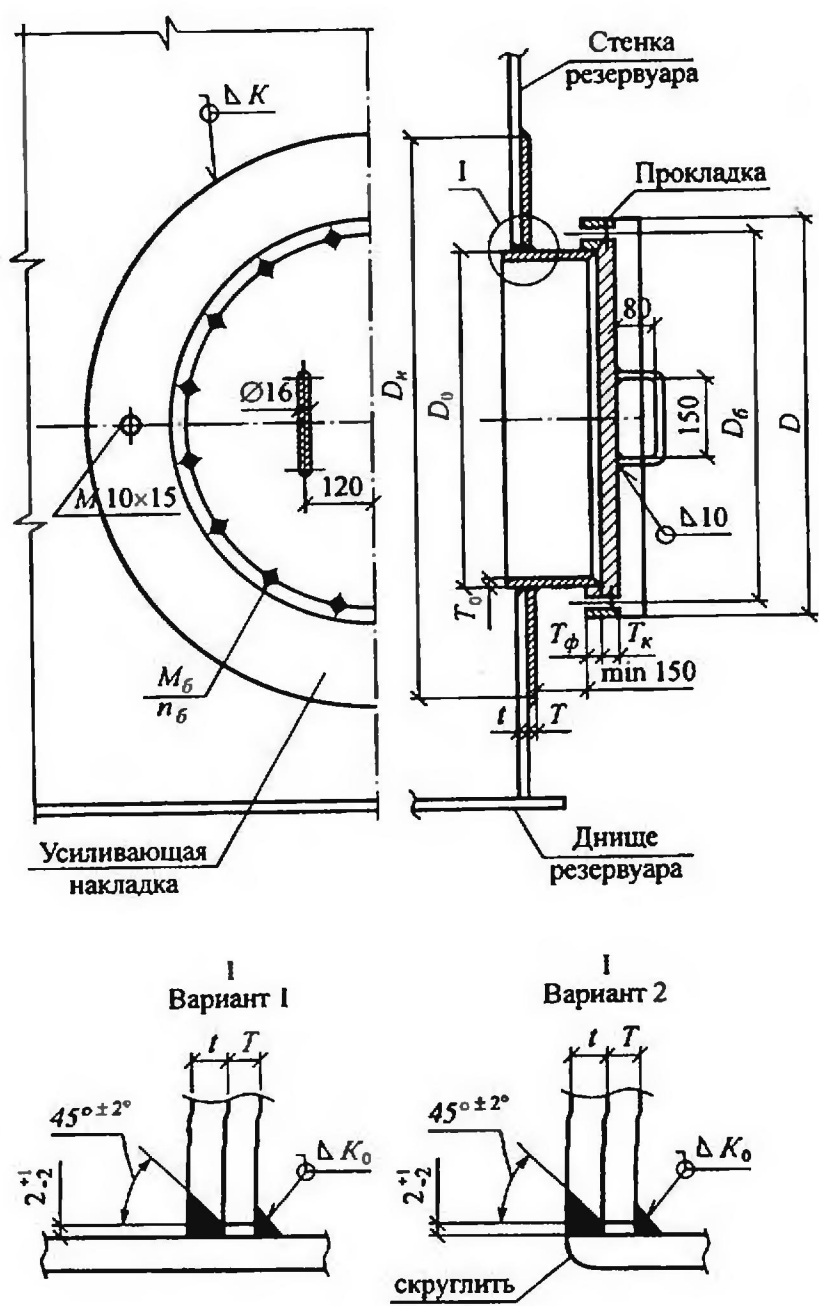


Рис. 3.34. Люк-лаз круглый в 1-м поясе стенки

Основные параметры люков-лазов

Наименование	Обозначение	Размер люка	
		$D_y 600$	$D_y 800$
Наружный диаметр крышки и фланца, мм	D	755	975
Диаметр расположения болтов, мм	D_b	705	920
Количество болтов, шт.	n	20	24
Номинальный диаметр резьбы болтов, мм	M_b	24	27
Диаметр отверстий под болты, мм	d_0	26	30
Минимальная толщина крышки, мм	T_k	16	21
Диаметр утолщенной части крышки, мм	D_{ym}	670	880
Диаметр выступа крышки, мм	D_e	590	780
Наружный диаметр обечайки, мм	D_o	630	820
Минимальная толщина обечайки, мм при толщине стенки резервуара:	T_o		
до 6 мм		6	
свыше 6 до 10 мм		8	
свыше 10 до 15 мм		10	
свыше 15 до 22 мм		12	
свыше 22 до 26 мм		14	
свыше 26 до 32 мм		16	
свыше 32 до 38 мм		20	
Наружный диаметр усиливающей накладки, мм	D_n	1260	1640
Катет шва приварки усиливающей накладки к обечайке, мм при толщине стенки резервуара:	K_o		
до 10 мм		6	
свыше 10 до 15 мм		8	
свыше 15 до 22 мм		10	
свыше 22 до 26 мм		12	
свыше 26 до 32 мм		14	
свыше 32 до 38 мм		16	

Примечание: параметры фланцев люков в таблице 3.7 принимать по ГОСТ 12820 на условное давление $P_y = 0,25$ МПа.

Минимальная площадь поперечного сечения накладки (в вертикальном направлении, совпадающем с диаметром отверстия) должна быть не менее произведения величины диаметра отверстия на толщину листа стенки резервуара. Рекомендуется выбирать толщину накладки, равную толщине стенки.

Усиление стенки в зонах врезок может не производиться в случае применения в данной зоне стенки вставок-листов большей толщины, которое

определяется расчетом. Допускается установка патрубков с условным проходом до 50 мм без воротника.

Существующая привязка приемо-раздаточных патрубков на 300...600 мм выше окraек увеличивает воронкообразование и «мертвый» осадок, снижая рабочий объем резервуара. Для решения этой проблемы предложено устройство заполнения и опорожнения резервуаров (УЗОР) в работе [12]. При этом устраняется «мертвый» осадок до уровня 0,07...0,10 м.

Патрубки в стенку резервуара должны ввариваться сплошным швом с полным проплавлением стенки. Катет сплошных угловых швов крепления накладок к стенке резервуара в зоне патрубка: $K_f = t$ при $t = 4...6$ мм; $K_f = t - 1$ мм при $t = 7...10$ мм; $K_f = t - 2$ мм при $t = 11...15$ мм.

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВУАРЫ ДЛЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

4.1. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Горизонтальный резервуар состоит из корпуса (стенки), двух днищ, опорных диафрагм, промежуточных колец жесткости, опор (рис. 4.1).

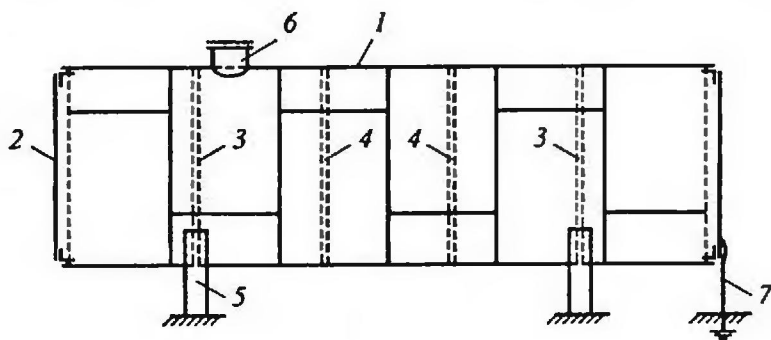


Рис. 4.1. Горизонтальный резервуар с плоскими днищами:

1 – стенка; 2 – днище; 3 – опорная диафрагма;
4 – промежуточное кольцо жесткости; 5 – опора; 6 – лаз; 7 – заземление

Стенка резервуара выполняется из нескольких листовых обечаек. Каждая обечайка изготавливается из листовой или рулонной стали. Ширину листов принимают в пределах 1500...2000 мм. Листы и обечайки соединяются между собой сварными стыковыми швами, за исключением монтажных стыков, которые могут свариваться внахлестку.

Для повышения жесткости стенки ее укрепляют опорными и промежуточными кольцами жесткости. Опорные кольца жесткости имеют дополнительную, чаще всего треугольную диафрагму. Днище резервуара конструируют плоским при избыточном давлении до 40 кПа и коническим – до 70 кПа. Плоское днище может быть безреберным и ребристым. Для обеспечения жесткости при транспортировке и монтаже, восприятия вакуума и ветровой нагрузки стенку резервуара усиливают кольцами жесткости из прокатных уголков, свальцованных на перо и приваренных пером к стенке. Промежуточные кольца жесткости обязательно следует ставить при $r/t \geq 200$ (r – радиус сечения стенки, t – толщина стенки резервуара).

Рекомендуемая толщина стенки рассматриваемого горизонтального цилиндрического резервуара повышенного давления принимается равной 4 или 5 мм в зависимости от объема и избыточного давления в резервуаре. В типовых резервуарах величина радиуса сечения колеблется в пределах от 1,0 м до 1,62 м ($V = 25...100 \text{ м}^3$).

Для рассматриваемого типа резервуаров при $t = 4$ или 5 мм величина r/t всегда больше 200. Поэтому необходимы промежуточные кольца жесткости, которые располагают через $1,5 \div 1,8$ м в зависимости от ширины листов, применяемых для стенки. В качестве промежуточных колец жесткости рекомендуется применять неравнополочные горячекатаные уголки по ГОСТ 8510-86* ([19]):

- при $V = 25 \dots 50 \text{ м}^3$ – номер уголка 8/5 ($\angle 80 \times 50 \times 5$);
- при $V = 75 \dots 100 \text{ м}^3$ – номер уголка 9/5,6 ($\angle 90 \times 56 \times 6$).

Надземные резервуары опираются на две седловидные опоры, расположенные на расстоянии $0,586 \cdot l_p$ друг от друга, или на две опоры стоечного типа. Угол охвата седловидной опоры изменяется от 60 до 120° . Корпус резервуара оборудуется штуцерами для загрузки, забора и вентиляции, горловиной с лазом и крышкой для осмотра, очистки и ремонта резервуара, а также наружной лестницей и заземлением.

4.2. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СТЕНКИ И ДНИЩ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Элементы горизонтального цилиндрического резервуара подвергаются воздействию нагрузок:

- гидростатическое давление жидкости;
- избыточное давление паров жидкости;
- вакуум;
- собственный вес;
- ветровая нагрузка;
- гололед.

Нагрузка в виде гидростатического давления зависит от плотности хранимой жидкости и глубины отсчета от ее поверхности, т.е.

$$g_{zd} = \gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot h \cdot g, \text{ (кН/м}^2\text{)}, \quad (4.1)$$

где $\gamma_{ж} = 1,1$;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости;

h – глубина отсчета от поверхности жидкости.

Величина избыточного давления задается

$$P_{изб} = \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}^n, \quad (4.2)$$

где $\gamma_{f_2} = 1,2$.

Расчетная величина вакуума принимается равной

$$P_{вак} = \gamma_{f_2} \cdot P_{вак}^n, \quad (4.3)$$

где $P_{вак}^n = 1,0 \text{ кПа}$.

Численные исследования тонкостенных резервуаров, проведенные автором, показали следующее: нормальные напряжения в стенке резервуара

от собственного веса не превышают $0,05 \text{ кН/см}^2$, от ветровой нагрузки (для I района) не более $0,2 \text{ кН/см}^2$. Гололедная нагрузка также вызывает малые значения нормальных напряжений. Поэтому в дальнейшем исключены из рассмотрения нагрузки от собственного веса, ветра и гололеда.

Стенка горизонтального цилиндрического резервуара представляет собой замкнутую цилиндрическую оболочку средней длины ($0,5 \leq l/r \leq 10$), свободно опирающуюся на две опоры. Такие оболочки рассчитывают на основе полумоментной теории В. З. Власова (изгибающие моменты вдоль образующих оболочки не учитывают, а в кольцевом направлении учитывают) и предположений В. В. Новожилова [13]:

1) пренебрегают касательным перемещением в выражении поперечной изгибной деформации;

2) исключают из дифференциального уравнения равновесия элемента оболочки член, содержащий поперечную силу Q_2 .

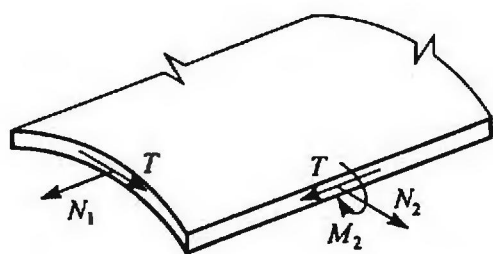


Рис. 4.2. Усилия в элементе стенки резервуара

С учетом указанных допущений в сечениях стенки горизонтального резервуара учитывают следующие усилия (рис. 4.2):

N_1 – продольное (вдоль образующей) нормальное;

N_2 – кольцевое нормальное;

M_2 – кольцевой изгибающий момент;

T – касательное.

При определении продольного нормального усилия N_1 от собственного веса резервуара, гидростатического давления жидкости при полном заполнении резервуара, сейсмических воздействий цилиндрическую замкнутую оболочку (стенку) можно заменить балкой кольцевого сечения при любых соотношениях геометрических параметров резервуара. Во всех остальных случаях стенку резервуара следует рассматривать как цилиндрическую оболочку.

На практике на все виды нагрузок горизонтальный цилиндрический резервуар рассматривается, как двухконсольная балка кольцевого сечения (рис. 4.3).

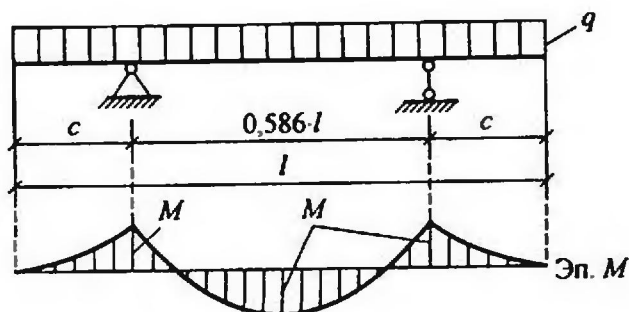


Рис. 4.3. Расчетная схема двухконсольного цилиндрического резервуара

Плоское безреберное днище (рис. 4.4 а) рассматривается, как мембрана с упругим закреплением по контуру (с учетом деформаций кольца жесткости, к которому крепится мембрана). Плоское ребристое днище рекомендуется применять, если для безреберного днища требуется толщина более 5 мм (рис. 4.5).

Коническое днище резервуара представляют безмоментной пологой конической оболочкой под давлением (рис. 4.4 б).

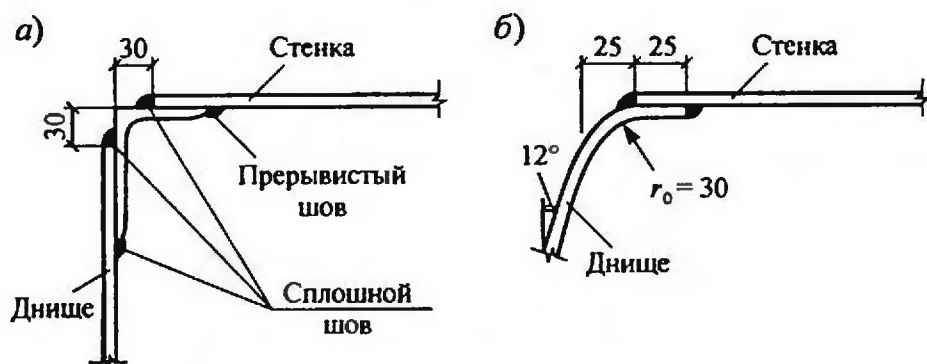


Рис. 4.4. Фрагменты типовых днищ:
а) плоского безреберного; б) конического

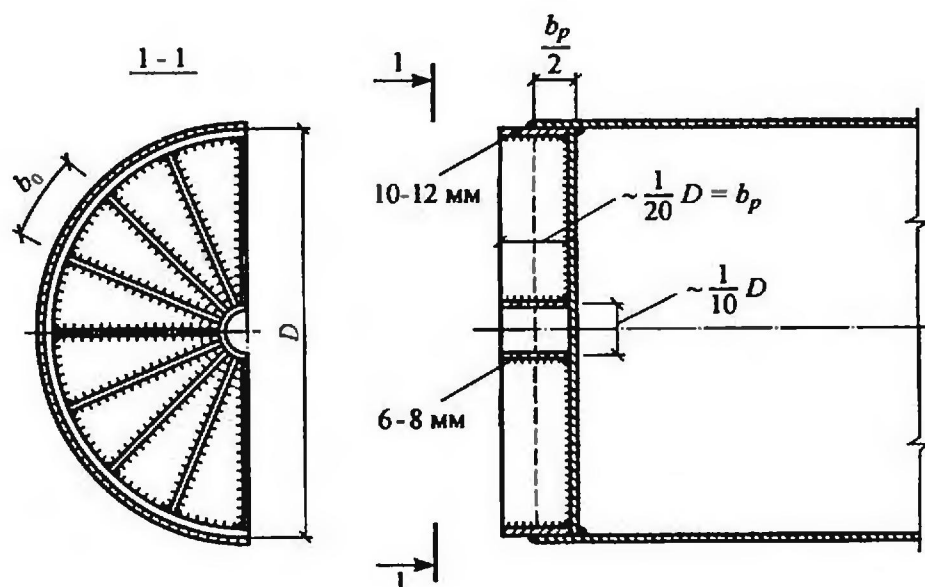


Рис. 4.5. Конструкция плоского ребристого днища

4.3. РАСЧЕТ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ

Толщина стенки резервуара определяется из условия прочности (не должна быть менее 4 мм) и проверяется на устойчивость.

Стенка резервуара при полном заполнении жидкостью и наличии избыточного давления испытывает наибольшие растягивающие нормальные

напряжения вдоль образующей в нижней точке сечения σ_1 и в кольцевом направлении σ_2 .

Нормальное напряжение σ_1 складывается из двух составляющих:
 $\sigma_1 = \sigma'_1 + \sigma''_1$:

– напряжение от давления жидкости и избыточного давления газа на днище

$$\sigma'_1 = \frac{(\gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot 2 \cdot r + \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}^H) \cdot r}{2 \cdot (t_w - c_1)}, \quad (4.4)$$

где $\gamma_{ж} = 1,1$;

t_w – номинальная толщина стенки;

$c_1 = 0,8$ мм – учет вытяжки металла при вальцовке листов;

r – радиус резервуара в поперечном сечении,

если при определении толщины стенки учитывались допуски на коррозию и на прокат, то их также следует вычесть из номинальной толщины t_w ;

– напряжение от изгиба корпуса, как двухконсольной балки кольцевого сечения

$$\sigma''_1 = \frac{M_q}{W}, \quad (4.5)$$

где $M_q = \frac{(q_p + q_{ж}) \cdot l^2}{47}, \quad (4.6)$

$$q_p = \frac{\gamma_g \cdot K \cdot \rho_{ст} \cdot s_0}{l} \text{ – погонная нагрузка от собственного веса резервуара,}$$

$$\gamma_g = 1,05;$$

$K = 1,1$ – коэффициент, учитывающий наличие ребер жесткости и оборудования на резервуаре;

$\rho_{ст} = 78,5$ кН/м³ – удельный вес стали;

$s_0 = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot l + K_2 \cdot r^2) \cdot t_w$ – объем стенки и днищ,

$l = \frac{V}{\pi \cdot r^2}$ – длина резервуара;

$K_2 = 6,28$ – при плоских днищах;

$K_2 = 6,69$ – при конических днищах;

$q_{ж} = \rho_{ж} \cdot g \cdot \pi \cdot r^2$ – погонный вес жидкости;

$W = \pi \cdot r^2 \cdot (t_w - c_1)$ – момент сопротивления кольцевого сечения стенки резервуара.

Нормальное напряжение в кольцевом направлении

$$\sigma_2 = \frac{(\gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot 2 \cdot r + \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}^H) \cdot r}{t_w - c_1} \leq \gamma_c \cdot R_{wy}, \quad (4.7)$$

где $\gamma_c = 0,8$;

R_{wy} – расчетное сопротивление стыкового шва растяжению при соответствующем контроле качества швов.

Проверка на прочность стенки по приведенным напряжениям осуществляется по формуле (2.4).

По формуле (4.7) можно определить расчетную толщину стенки из условия прочности.

Устойчивость стенки резервуара, как замкнутой цилиндрической оболочки, проверяется на сжимающие напряжения от вакуума, ветровой нагрузки и собственного веса пустого резервуара по формулам (2.13), (2.6), (2.9).

В формуле (2.13) напряжение вдоль образующей σ_1 определяется по формуле

$$\sigma_1 = \sigma_1^{III} + \sigma_1^{IV}, \quad (4.8)$$

где $\sigma_1^{III} = \frac{\gamma_{f2} \cdot P''_{вак} \cdot r}{2 \cdot t_w}$ – напряжение от вакуума;

$\sigma_1^{IV} = \frac{q_p \cdot l^2}{47 \cdot W}$ – напряжение изгиба от собственного веса резервуара.

Кольцевое напряжение также состоит из двух слагаемых:

$$\sigma_2 = \sigma_2^I + \sigma_2^{II}, \quad (4.9)$$

где $\sigma_2^I = \frac{\gamma_{f2} \cdot P''_{вак} \cdot r}{t_w}$ – напряжение от вакуума;

$\sigma_2^{II} = \frac{0,5 \cdot \gamma_e \cdot w_0 \cdot K_0 \cdot r}{t_w}$ – напряжение от ветровой нагрузки в виде условного вакуума.

Критическое напряжение вдоль образующей σ_{cr1} определяется по формулам (2.6) с дополнительным коэффициентом ξ [17], учитывающим неравномерность сжатия оболочки по сечению вследствие ее изгиба от собственного веса

$$\xi \cdot \psi \cdot R_y \text{ или } \frac{\xi \cdot c \cdot E \cdot t_w}{r}, \quad (4.10)$$

где $\xi = 1,1 - 0,1 \cdot \frac{\sigma_{1\min}}{\sigma_{1\max}}$,

$$\sigma_{1\min} = \sigma_1^{III} - \sigma_1^{IV}; \quad \sigma_{1\max} = \sigma_1^{III} + \sigma_1^{IV}.$$

4.4. ПРИМЕР РАСЧЕТА СТЕНКИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА

Исходные данные. Вместимость резервуара $V = 100 \text{ м}^3$; хранимый продукт – нефть ($\rho_{ж} = 0,9 \text{ т/м}^3$); внутреннее избыточное давление $P''_{изб} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кН/см}^2$; вакуум $P''_{вак} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ кН/см}^2$. Материал конструкций – сталь марки ВСтЗсп5-1 ($R_y = 24 \text{ кН/см}^2$ при $t = 4 \dots 10 \text{ мм}$). Место строительства: I – ветровой район.

Определяем диаметр резервуара по формуле

$$D_{онт} = 0,8 \cdot \sqrt[3]{V} = 0,8 \cdot \sqrt[3]{100} = 3,72 \text{ м.}$$

Из условия транспортировки по железной дороге примем $D = 3,25$ м, радиусом $r = 1,625$ м.

Длина корпуса резервуара при плоских днищах

$$l = \frac{V}{\pi \cdot r^2} = \frac{100,0}{3,1416 \cdot 1,625^2} = 12,054 \text{ м.}$$

Выбираем листы для корпуса 1500×6000 мм; с учетом строжки кромок – 1490×5990 мм.

При ширине листа $b_n = 1,49$ м требуется количество колец (обечаек)

$$n_{об} = \frac{l}{b_n} = \frac{12,054}{1,49} = 8,09 \text{ шт.}$$

Следует принять $n_{об} = 8$ шт. Тогда длина резервуара составит

$$l = n_{об} \cdot b_n = 8 \cdot 1,49 = 11,92 \text{ м.}$$

При этом фактический объем резервуара

$$V_{\phi} = \pi \cdot r^2 \cdot l = 3,1416 \cdot 1,625^2 \cdot 11,92 = 98,9 \text{ м}^3,$$

что в пределах допустимого. Фактический объем резервуара меньше заданного на

$$\frac{100,0 - 98,9}{100,0} \cdot 100 \% = 1,1 \% < 3 \% .$$

Толщина стенки определяется по формуле (4.7)

$$t_w = \frac{(\gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot 2 \cdot r + \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}^H) \cdot r}{\gamma_c \cdot R_{wy}} + c_1 =$$

$$= \frac{(1,1 \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 162,5 + 1,2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}) \cdot 162,5}{0,8 \cdot 24,0} + 0,08 = 0,147 \text{ см,}$$

при $R_{wy} = R_y = 24,0 \text{ кН/см}^2$.

Если учесть минусовой допуск отклонения толщины листов (см. табл. 1.3) $\delta = 0,4$ мм и припуск на коррозию $\Delta = 0,1$ мм, то требуемая толщина стенки составит:

$$t_{мп} = 1,47 + 0,4 + 0,1 = 1,97 \text{ мм.}$$

Следует принять толщину стенки $t_w = 4$ мм.

Проверяем устойчивость стенки по формуле (2.13). В расчетные формулы следует подставлять расчетную толщину стенки

$$t_{p,w} = t_w - c_1 - \delta - \Delta = 4,0 - 0,8 - 0,4 - 0,1 = 2,7 \text{ мм.}$$

Вычислим значения нормальных напряжений в стенке резервуара

$$\sigma_1^{III} = \frac{1,2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 162,5}{2 \cdot 0,27} = 0,0361 \text{ кН/см}^2.$$

Нагрузка от собственного веса резервуара

$$q_p = \frac{1,05 \cdot 1,1 \cdot 78,5 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 162,5 \cdot 1192,0 + 6,28 \cdot 162,5^2) \cdot 0,27}{1192,0} = 0,028 \text{ кН/см};$$

$$W = 3,14 \cdot 162,5^2 \cdot 0,27 = 22387 \text{ см}^3;$$

$$\sigma_1^{IV} = \frac{0,028 \cdot 162,5^2}{47 \cdot 22387} = 0,0007 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma_{1\min} = 0,0361 - 0,0007 = 0,0354 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma_{1\max} = 0,0361 + 0,0007 = 0,0368 \text{ кН/см}^2;$$

$$\xi = 1,1 - 0,1 \cdot \frac{0,0354}{0,0368} = 1,004;$$

$$\sigma_1 = \sigma_{1\max} = 0,0368 \text{ кН/см}^2.$$

Кольцевые напряжения:

$$\sigma_2^I = \frac{1,2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 162,5}{0,27} = 0,0722 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma_2^{II} = \frac{0,5 \cdot 1,4 \cdot 0,23 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 \cdot 162,5}{0,27} = 0,0048 \text{ кН/см}^2,$$

где $\kappa_0 = 0,5$ – для местности типа В;

$$\sigma_2 = 0,0722 + 0,0048 = 0,077 \text{ кН/см}^2.$$

Критические напряжения при $r/t_{p,w} = 162,5/0,27 = 602 > 300$.

$$\sigma_{cr1} = \frac{\xi \cdot c \cdot E \cdot t_{p,w}}{r} = \frac{1,004 \cdot 0,11 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 0,27}{162,5} = 3,78 \text{ кН/см}^2.$$

Здесь $c = 0,11$ при $r/t_{p,w} = 602$ (см. табл. 2.2).

$$\begin{aligned} \sigma_{cr2} &= 0,55 \cdot E \cdot \left(\frac{r}{l_0} \right) \cdot \left(\frac{t_{p,w}}{r} \right)^{3/2} = \\ &= 0,55 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{162,5}{698,5} \right) \cdot \left(\frac{0,27}{162,5} \right)^{3/2} = 0,178 \text{ кН/см}^2. \end{aligned}$$

Здесь $l_0 = 0,586 \cdot l = 0,586 \cdot 1192,0 = 698,5$ см; кольца жесткости учитывались только на опорах.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} = \frac{0,0368}{3,78} + \frac{0,077}{0,178} = 0,44 < \gamma_c = 1,0.$$

Таким образом, устойчивость стенки резервуара обеспечена даже без учета промежуточных ребер жесткостей. Однако установка промежуточных ребер обязательна, поскольку $r/t_w = 162,5/0,4 = 406 > 200$.

4.5. РАСЧЕТ ПЛОСКИХ И КОНИЧЕСКИХ ДНИЩ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА

а) Расчет плоских безреберных днищ

Предварительно следует назначить сечение кольца жесткости в плоскости днища из неравнополочного прокатного уголка. Рекомендуются принять $\angle 110 \times 70 \times 8$ для резервуаров $V = 75 \dots 100 \text{ м}^3$ и $\angle 100 \times 63 \times 6$ при $V = 25 \dots 50 \text{ м}^3$. Также следует задаться толщиной днища $t_{\text{дн}} = 4 \dots 5 \text{ мм}$ и проверить на прочность:

$$\sigma_{\text{дн}}^y = \frac{P_u \cdot D^2}{16 \cdot f_y \cdot t_{\text{дн},p}} \leq \gamma_c \cdot R_y, \quad (4.11)$$

где $\sigma_{\text{дн}}^y$ – нормальное радиальное напряжение в центре днища;

$\gamma_c = 0,8$;

$P_u = \gamma_{\text{жс}} \cdot \rho_{\text{жс}} \cdot g \cdot r + \gamma_{f_2} \cdot P_{\text{изб}}^H$ – давление в центре днища;

D – диаметр сечения резервуара;

$t_{\text{дн},p}$ – расчетная толщина днища за вычетом припусков на вальцовку, прокат и коррозию;

f_y – прогиб плоского днища в центре, определяемый по формуле [20]:

$$f_y = \frac{D}{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P_u}{E} \cdot \left[\frac{(1-\nu) \cdot D}{2 \cdot t_{\text{дн},p}} + \frac{D^2}{4 \cdot A_k} \cdot \left(1 + \frac{A_k \cdot y^2}{J_x} \right) \right]}, \quad (4.12)$$

где $\nu = 0,3$ – коэффициент Пуассона;

A_k – сечение кольца жесткости;

J_x – момент инерции сечения кольца жесткости относительно центра днища;

y – ордината внешней поверхности уголка кольца жесткости относительно центра днища.

В рассматриваемом случае плоское безреберное днище имеет расчетную схему в виде круглой мембраны, упруго закрепленной по контуру, т.е. с учетом деформации кольца жесткости.

б) Расчет плоско-ребристых днищ (рис. 4.5)

Плоское днище опирается на n_p радиально расположенных ребер. Для расчета выделяется полоска единичной ширины, которая опирается на радиальные ребра как неразрезная балка (рис. 2.9), работающая по схеме изгибно-жесткой нити. Число радиальных ребер n_p принимается кратным 4. Расстояние между ребрами по краю днища

$$b_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{n_p} \quad (4.13)$$

Чтобы рассчитать полосу днища по балочной схеме, необходимо отступить от края днища примерно на $0,9 \cdot b_0$. Тогда

$$a = b_0 \cdot \left(1,0 - 0,9 \cdot \frac{b_0}{r} \right) \quad (4.14)$$

Полоска днища воспринимает растягивающее усилие H и изгибающий момент, который будет максимальным над ребром (опорой); проверяется на прочность по формуле

$$\sigma = \frac{H}{A_n} + \frac{M_{on}}{W_n} \leq \gamma_c \cdot R_y, \quad (4.15)$$

где $H = \frac{P_u \cdot a^2}{8 \cdot f} - \frac{48 \cdot E \cdot J}{a^2}$; $f \approx \frac{1}{5} \sqrt[3]{\frac{3}{64} \cdot \frac{P_u \cdot a^4}{E \cdot A_n}}$;

$$M_{on} = \frac{P_u}{K} \cdot \left(\frac{1}{K} - \frac{a}{2} \right); \quad \bar{K} = \sqrt{\frac{H}{EJ}};$$

$A_n = 1 \cdot t_{\text{дн}}$ – площадь сечения полосы днища;

$$W = \frac{1 \cdot t_{\text{дн}}^2}{6} \text{ – момент сопротивления сечения полосы;}$$

$$J = \frac{1 \cdot t_{\text{дн}}^3}{12} \text{ – момент инерции сечения полосы;}$$

$$\gamma_c = 1,0.$$

В случае если прочность днища недостаточна, то надо увеличить количество радиальных ребер. Радиальное ребро проверяют на прочность, как балку на двух опорах (рис. 4.6).

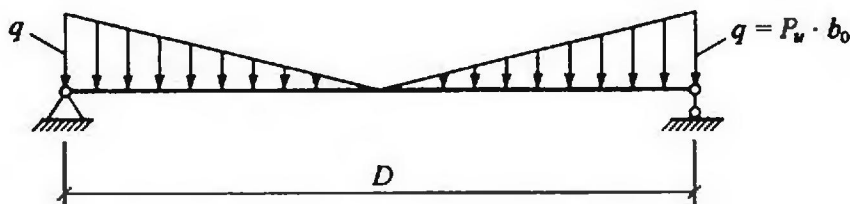


Рис. 4.6. Расчетная схема радиального ребра плоского днища

в) Расчет конических днищ

Конические днища применяют при избыточном давлении от 40 до 70 кПа и рассчитывают на прочность от гидростатического и избыточного давлений и на устойчивость от воздействия вакуума. Расчетные схемы конического днища показаны на рис. 4.7.

На прочность коническое днище проверяется по формуле:

$$\sigma_2 = \frac{P_u \cdot r}{t_{\partial n, p} \cdot \cos \beta} \leq \gamma_c \cdot R_{wy}, \quad (4.16)$$

где P_u – см. обозначения к формуле (4.11);

$\gamma_c = 0,8$; $R_{wy} = 0,85 \cdot R_y$;

σ_2 – кольцевое нормальное напряжение;

$\sigma_1 = 0,5 \cdot \sigma_2$ – нормальное напряжение вдоль образующей конуса;

β – угол между образующей конуса и его осью.

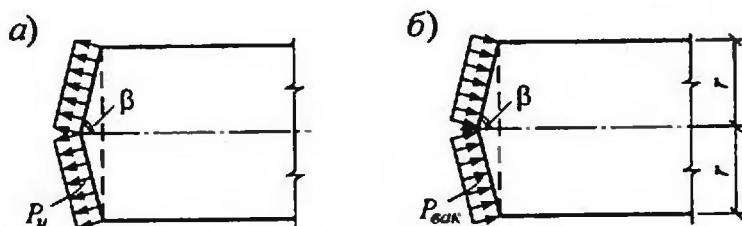


Рис. 4.7. Воздействия на коническое днище

На устойчивость коническое днище проверяется по формуле

$$\sigma_2 \leq \gamma_c \cdot \sigma_{cr2}, \quad (4.17)$$

где

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_{f2} \cdot P_{вск}^H \cdot r}{t_{\partial n, p} \cdot \cos \beta}; \quad (4.18)$$

$$\sigma_{cr2} = 0,495 \cdot E \cdot \frac{\sin \beta}{\cos^2 \beta} \cdot \left(\frac{t_{\partial n, p} \cdot \cos \beta}{0,9 \cdot r} \right)^{3/2}. \quad (4.19)$$

Формула (4.19) справедлива при $\beta \leq 60^\circ$.

4.6. КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ СОПРЯЖЕНИЯ ПЛОСКИХ ДНИЩ СО СТЕНКОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА

Плоское днище через кольцо жесткости, которое является составной частью днища, внецентренно передает усилия на примыкающий к днищу участок стенки, вызывая в нем и периферийной части днища изгибающий момент.

В справочнике [20] проектировщика по металлическим конструкциям схематично изложена техническая теория расчета узла сопряжения плоского днища со стенкой резервуара. Кроме того, в этой зоне не учитывается изгибающий момент краевого эффекта.

Гидростатическое и избыточное давления вызывают растяжение в днище и сжатие в кольце жесткости. При расчете днища принимают давление равномерно распределенным, соответствующим давлению в центре днища.

Нормальные растягивающие напряжения, возникающие в центре в центре днища, определяются по формуле (4.11).

В связи с тем, что днище под давлением получает прогиб, нормальные радиальные напряжения по контуру днища будут меньшей величины, чем в центре. Их можно определить по формуле:

$$\sigma_{\partial n}^k = \alpha \cdot \sigma_{\partial n}^y, \quad (4.20)$$

где $\alpha \approx 0,674$. Коэффициент α определен по справочнику [25], как для мембраны с несмещающимся контуром, сравнивая значения напряжений в центре и по контуру.

Часть напряжения $\sigma_{\partial n}^k$ воспринимается кольцом жесткости, а другая часть – цилиндрической оболочкой (стенкой) в зоне центра тяжести сечения кольца жесткости, определяемая по формуле (4.21).

$$\sigma_{yk} = \sigma_{\partial n}^k \cdot \left[1 / \left(1 + \frac{A_k \cdot \beta}{2 \cdot t_{\partial n}} \right) \right], \quad (4.21)$$

где $\beta = 4 \sqrt{\frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{D^2 \cdot t_{\partial n}^2}}$ – коэффициент деформации днища.

Вследствие внецентренного приложения усилия $T_{yk} = \sigma_{yk} \cdot t_{\partial n}$ от днища в зоне сопряжения днища со стенкой возникает изгибающий момент (рис. 4.8).

$$M_{ст} = T_{yk} \cdot e. \quad (4.22)$$

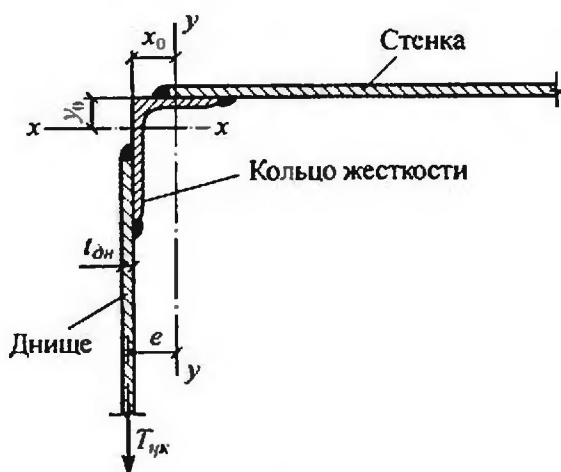


Рис. 4.8. К расчету узла сопряжения днища со стенкой

Нормальные напряжения в стенке (и в днище тоже) от момента $M_{ст}$ значительны. В справочнике [20] даны рекомендации по применению в расчетах данного узла шарнира пластичности, которая окажется в зоне сварного шва. Но при этом не учитывают влияние момента краевого эффекта, аналогичного моменту в зоне сопряжения стенки с днищем вертикального цилиндрического резервуара, который снижает действие $M_{ст}$.

Для определения изгибающего момента в зоне краевого эффекта в результате действия гидростатического и избыточного давлений так же, как при расчете вертикального цилиндрического резервуара, рассматриваются полоски единичной ширины, вырезанные из стенки и дна и жестко соединенные между собой в узле. Причем, полоска, вырезанная из стенки, рассматривается, как балка на упругом основании. А полоска дна, как элемент круглой тонкой пластинки.

Основную систему метода сил можно получить путем введения шарниров в узлах соединения дна со стенкой (рис. 4.9). При этом давление на дне принимается равномерным и равным давлению в центре дна P_u (см. обозначения в формуле (4.11)).

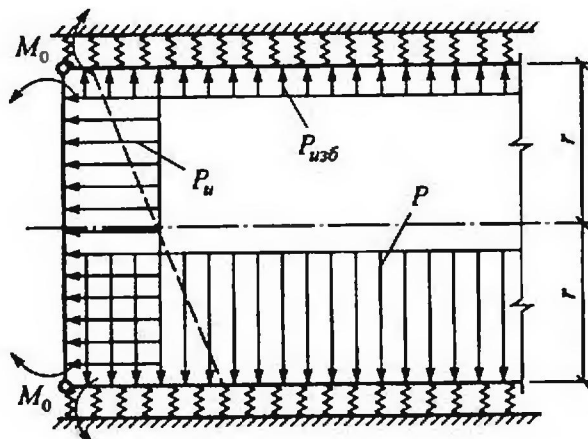


Рис. 4.9. Основная система сопряжения стенки с дном

Каноническое уравнение метода сил

$$(\delta_{11}^{cm} + \delta_{11}^{\partial n}) \cdot M_0 + (\Delta_{1p}^{cm} + \Delta_{1p}^{\partial n}) = 0. \quad (4.23)$$

Для определения коэффициента δ_{11}^{cm} и свободного члена Δ_{1p}^{cm} уравнения (4.23) использованы балочные функции А. Н. Крылова и метод начальных параметров при расчете балок конечной длины на упругом основании [32]. В итоге для стенки получим

$$\delta_{11}^{cm} = \frac{2 \cdot \beta_{cm}^3}{K_{cm}}; \quad \Delta_{1p}^{cm} = -\frac{P \cdot \beta_{cm}}{K_{cm}}, \quad (4.24)$$

где $P = \gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot 2 \cdot r + \gamma_{f2} \cdot P_{изб}$;

$$\beta_{cm} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{r^2 \cdot t_{cm}^2}}; \quad K_{cm} = \frac{E \cdot t_{cm}}{r^2}.$$

При построении формул для определения коэффициента $\delta_{11}^{\partial n}$ и свободного члена $\Delta_{1p}^{\partial n}$ полоски дна следует принимать разные расчетные схемы в зависимости от силовых воздействий, изображенные на рис. 4.10.

Угол поворота опорных сечений от равномерно распределенных единичных моментов по контуру круглой пластинки, шарнирно опертой по краям, соответствует коэффициенту $\delta_{11}^{\partial n}$ (рис. 4.10 а), который можно определить по формуле, приведенной в справочнике [25]

$$\delta_{11}^{\partial n} = 12 \cdot \frac{r \cdot (1 - \nu)}{E \cdot t_{\partial n}^3} \quad (4.25)$$

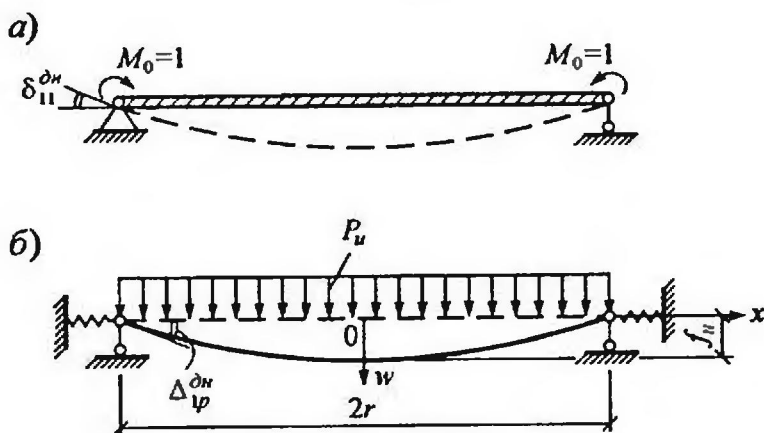


Рис. 4.10. К определению $\delta_{11}^{\partial n}$ и $\Delta_{1p}^{\partial n}$

Для определения угла поворота опорных сечений от равномерно распределенной нагрузки днище ($\Delta_{1p}^{\partial n}$) представлено полой безмоментной оболочкой, в которую оно превращается при деформировании круглой мембраны, упруго закрепленной по контуру (рис. 4.10 б). Ординаты полой оболочки определяются по формуле [5]

$$w = f_{\psi} \cdot a \cdot \left(\frac{1}{a} - 2 \cdot \frac{x^2}{r^2} + b \cdot \frac{x^4}{r^4} \right), \quad (4.26)$$

где f_{ψ} – прогиб центра днища, определяемый по формуле (4.12);

$$a = \frac{3 + \nu}{5 + \nu}; \quad b = \frac{1 + \nu}{3 + \nu};$$

ν – коэффициент Пуассона;

x – переменный радиус днища с началом в центре.

$$\Delta_{1p}^{\partial n} = \frac{dw}{dx} \Big|_{x=r} = - \frac{8 \cdot f_{\psi}}{r \cdot (5 + \nu)}. \quad (4.27)$$

Значение основного неизвестного M_0 определяется из уравнения (4.23).

Прочность сопряжения плоского днища со стенкой следует проверять по разности изгибающих моментов от внецентренного приложения усилия от днища и момента краевого эффекта, т.е. по расчетному моменту

$$M = |M_{cm}| - |M_0|. \quad (4.28)$$

При этом стенка резервуара в зоне краевого эффекта будет испытывать меньшие нормальные напряжения. И расчет узла сопряжения дна со стенкой на прочность можно проводить по упругой стадии. Если применить конструкцию сечения кольца, изображенную на рис. 4.11, то момент $M_{cm} = 0$.

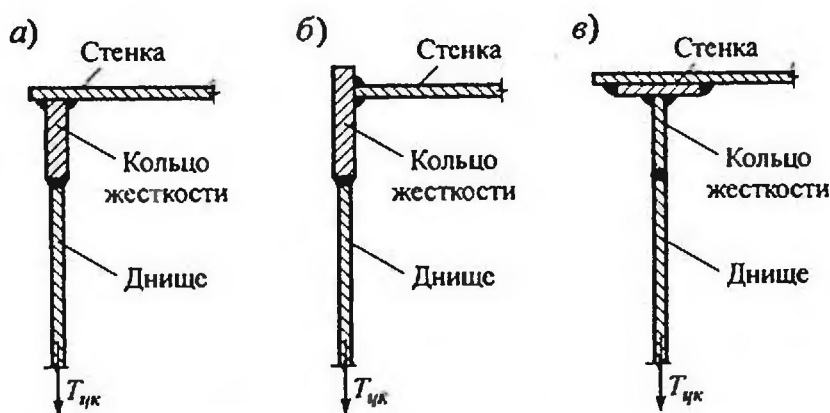


Рис. 4.11. Рациональные типы сечений кольца жесткости

Предлагаемые типы кольца жесткости не требуют вальцовки, что упрощает процесс изготовления кольца.

4.7. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПЛОСКОГО ДНИЩА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА

Примем кольцо жесткости в плоскости дна из неравнополочного прокатного уголка $110 \times 70 \times 8$ ($A_{yz} = 13,9 \text{ см}^2$; $J_{x_0} = 172 \text{ см}^4$; $y_0 = 3,61 \text{ см}$; $x_0 = 1,64 \text{ см}$) (см. рис. 4.8), $t_{дн} = 5 \text{ мм}$. С учетом отклонений по толщине листов и припуска на коррозию $t_{дн,р} = 4,5 \text{ мм}$. Требуется проверить на прочность безреберное днище при исходных данных примера в п. 4.4.

Для расчета дна гидростатическое давление принимается равномерным и равным давлению в его центре при полном заполнении резервуара жидкостью. Суммарное давление жидкости и избыточное давление в центре дна

$$P_u = \gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot r + \gamma_{f_2} \cdot P_{изб} =$$

$$= 1,1 \cdot 900 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 162,5 + 1,2 \cdot 40,0 \cdot 10^{-4} = 63,78 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2.$$

Момент инерции сечения кольца жесткости относительно центра дна

$$J_x = J_{x_0} + A_{yz} \cdot (r - t_{cm} - y_0)^2 =$$

$$= 172,0 + 13,9 \cdot (162,5 - 0,4 - 3,61)^2 = 349327 \text{ см}^4.$$

Ордината внешней поверхности уголка относительно центра дна

$$y = r - t_{cm} = 162,5 - 0,4 = 162,1 \text{ см}.$$

Прогиб центра днища от равномерного давления на него P_u по формуле (4.12)

$$f_y = \frac{D}{4} \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P_u}{E} \left[\frac{(1-\nu) \cdot D}{2 \cdot t_{\partial n, p}} + \frac{D^2}{4 \cdot A_{yz}} \left(1 + \frac{A_{yz} \cdot y^2}{J_x} \right) \right]} =$$

$$= \frac{325}{4} \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 63,78 \cdot 10^{-4}}{2,06 \cdot 10^4} \cdot \left[\frac{(1-0,3) \cdot 325}{2 \cdot 0,45} + \frac{325^2}{4 \cdot 13,9} \cdot \left(1 + \frac{13,9 \cdot 162,1^2}{349327} \right) \right]} = 12,7 \text{ см.}$$

Радиальные растягивающие напряжения в центре днища

$$\sigma_{\partial n}^y = \frac{P_u \cdot D^2}{16 \cdot f_y \cdot t_{\partial n, p}} = \frac{63,78 \cdot 10^{-4} \cdot 325^2}{16 \cdot 12,7 \cdot 0,45} = 7,37 \text{ кН/см}^2 <$$

$$< \gamma_c \cdot R_y = 0,8 \cdot 24,0 = 19,2 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность днища обеспечена в центре. Однако по контуру днища будет оказывать существенное влияние на напряженное состояние местный изгибающий момент от внецентренного крепления днища к кольцу жесткости. Поэтому окончательное суждение о прочности днища будет дано ниже.

Проверим на прочность сопряжение плоского днища со стенкой.

Нормальные радиальные напряжения на контуре днища по формуле (4.20)

$$\sigma_{\partial n}^k = \alpha \cdot \sigma_{\partial n}^y = 0,674 \cdot 7,37 = 4,97 \text{ кН/см}^2.$$

Нормальные напряжения, передающиеся от днища на стенку резервуара в зоне центра тяжести сечения кольца жесткости, определяются по формуле (4.21). Предварительно вычислим коэффициент деформации днища

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{12 \cdot (1-\nu^2)}{D^2 \cdot t_{\partial n, p}^2}} = \sqrt[4]{\frac{12 \cdot (1-0,3^2)}{325^2 \cdot 0,45^2}} = 0,15 \frac{1}{\text{см}}.$$

$$\sigma_{\text{чк}} = \sigma_{\partial n}^k \cdot \left[1 / \left(1 + \frac{A_{yz} \cdot \beta}{2 \cdot t_{\partial n, p}} \right) \right] = 4,97 \cdot \left[1 / \left(1 + \frac{13,9 \cdot 0,15}{2 \cdot 0,45} \right) \right] = 1,5 \text{ кН/см}^2.$$

Соответственно, усилие на единицу длины контура днища

$$T_{\text{чк}} = \sigma_{\text{чк}} \cdot t_{\partial n, p} = 1,5 \cdot 0,45 = 0,675 \text{ кН/см.}$$

Изгибающий момент в стенке в зоне сопряжения с днищем

$$M_{\text{ст}}^{\partial n} = T_{\text{чк}} \cdot e,$$

где $e = x_0 + 0,5 \cdot t_{\partial n} = 1,64 + 0,5 \cdot 0,5 = 1,89 \text{ см.}$

$$M_{\text{ст}}^{\partial n} = 0,675 \cdot 1,89 = 1,28 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

Проверим на прочность стенку и днище резервуара в узле их сопряжения.

Напряжение в стенке без учета краевого эффекта ($t_{cm} = 4$ мм)

$$\sigma_{cm} = \frac{M_{cm}^{\partial n}}{W} = \frac{6 \cdot 1,28}{0,35^2} = 62,7 \text{ кН/см}^2 >$$

$$> \gamma_c \cdot \gamma_u \cdot R_y = 0,8 \cdot 1,5 \cdot 24,0 = 28,8 \text{ кН/см}^2 -$$

прочность стенки не обеспечена.

Напряжение в днище

$$\sigma_{\partial n} = \sigma_{\text{ук}} + \frac{6 \cdot M_{cm}^{\partial n}}{t_{\partial n, p}^2} = 1,5 + \frac{6 \cdot 1,28}{0,45^2} = 39,4 \text{ кН/см}^2 > \gamma_c \cdot \gamma_u \cdot R_y -$$

прочность днища не обеспечена в этой зоне. Следует плоское днище укрепить ребрами жесткости.

Вычислим в зоне сопряжения днища со стенкой изгибающий момент краевого эффекта M_0 по формуле (4.23). Предварительно найдем коэффициенты и свободные члены канонического уравнения метода сил (4.23) по формулам (4.24), (4.25) и (4.27)

$$\beta_{cm} = 4 \sqrt{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{r^2 \cdot t_{cm, p}^2}} = 4 \sqrt{\frac{3 \cdot (1 - 0,3^2)}{162,5^2 \cdot 0,35^2}} = 0,17 \frac{1}{\text{см}};$$

$$K_{cm} = \frac{E \cdot t_{cm, p}}{r^2} = \frac{2,06 \cdot 10^4 \cdot 0,35}{162,5^2} = 0,27 \text{ кН/см}^3;$$

$$\delta_{11}^{cm} = \frac{2 \cdot \beta_{cm}^3}{K_{cm}} = \frac{2 \cdot 0,17^3}{0,27} = 36,4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{кН}};$$

$$\Delta_{1p}^{cm} = -\frac{P \cdot \beta_{cm}}{K_{cm}} = -\frac{80,0 \cdot 10^{-4} \cdot 0,17}{0,27} = -5,04 \cdot 10^{-3},$$

где

$$P = \gamma_{жс} \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot 2 \cdot r + \gamma_{f_2} \cdot P_{изб} =$$

$$= 1,1 \cdot 900 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 162,5 + 1,2 \cdot 40,0 \cdot 10^{-4} = 80,0 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^3;$$

$$\delta_{11}^{\partial n} = 12 \cdot \frac{r \cdot (1 - \nu)}{E \cdot t_{\partial n, p}^3} = \frac{12 \cdot 162,5 \cdot (1 - 0,3)}{2,06 \cdot 10^4 \cdot 0,45^3} = 727,0 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{кН}};$$

$$\Delta_{1p}^{\partial n} = -\frac{8 \cdot f_u}{r \cdot (5 + \nu)} = -\frac{8 \cdot 12,7}{162,5 \cdot (5 + 0,3)} = -118,0 \cdot 10^{-3}.$$

Полученные значения подставляем в уравнение (4.23)

$$(36,4 + 727,0) \cdot 10^{-3} \cdot M_0 + (-5,04 - 118,0) \cdot 10^{-3} = 0,$$

отсюда

$$M_0 = 0,161 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

Суммарный изгибающий момент в зоне краевого эффекта

$$M = |M_{cm}^{\partial n}| - |M_0| = 1,280 - 0,161 = 1,119 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

Проверим стенку резервуара на прочность в зоне краевого эффекта без учета меридиональных напряжений, величина которых незначительна

$$\sigma_{cm} = \frac{6 \cdot M}{t_{cm,p}^2} = \frac{6 \cdot 1,119}{0,35^2} = 54,8 \text{ кН/см}^2 > \gamma_c \cdot \gamma_u \cdot R_y = 28,8 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность стенки резервуара в зоне краевого эффекта недостаточна. Однако если принять кольцо жесткости днища в соответствии с рис. 4.11, то $M_{cm}^{\partial n} = 0$ и остается только один момент M_0 . При этом

$$\sigma_{cm} = \frac{6 \cdot 0,161}{0,35^2} = 7,9 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot \gamma_u \cdot R_y,$$

т.е. прочность стенки обеспечена.

Если оставить кольцо жесткости днища по рис. 4.8, то необходимо толщину стенки увеличить и принять равной 6 мм.

Проверим на прочность вариант плоско-ребристого днища толщиной $t_{\partial n} = 5$ мм.

Конструкцию плоско-ребристого днища примем, как показано на рис. 4.5.

Пусть количество радиальных ребер днища $n_p = 24$ шт.

Ребро – пластинка толщиной 10 мм и шириной $b_p = 160$ мм $\left(\sim \frac{1}{20} D \right)$.

Расстояние между осями ребер по контуру днища

$$b_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{n_p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 162,5}{24} = 42,5 \text{ см.}$$

Расчетный пролет полосы днища по формуле (4.14)

$$a = b_0 \cdot \left(1,0 - 0,9 \cdot \frac{b_0}{r} \right) = 42,5 \cdot \left(1,0 - 0,9 \cdot \frac{42,5}{162,5} \right) = 32,5 \text{ см.}$$

Стрелу прогиба единичной ширины полосы днища, как изгибно-жесткой нити, при расчетном давлении $P_u = 64,0 \cdot 10^{-4}$ кН/см² и расчетной толщине днища $t_{\partial n,p} = 4,5$ мм приближенно можно определить по формуле

$$f \approx \frac{1}{5} \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{64} \cdot \frac{P_u \cdot a^4}{A_n \cdot E}} = \frac{1}{5} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 64 \cdot 10^{-4} \cdot 32,5^4}{64 \cdot 0,45 \cdot 1,0 \cdot 2,06 \cdot 10^4}} = 0,066 \text{ см.}$$

Распор изгибно-жесткой нити

$$H = \frac{P_u \cdot a^2}{8 \cdot f} - \frac{48 \cdot E \cdot J_n}{a^2} = \frac{64,0 \cdot 10^{-4} \cdot 32,5^2}{8 \cdot 0,066} - \frac{48 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 0,45^3}{32,5^2 \cdot 12} = 5,694 \text{ кН/см.}$$

Коэффициент

$$\bar{K} = \sqrt{\frac{H}{E \cdot J_n}} = \sqrt{\frac{5,694 \cdot 12}{2,06 \cdot 10^4 \cdot 0,45^3}} = 0,191 \frac{1}{\text{см}}.$$

Опорный момент полоски единичной ширины (изгибно-жесткой нити)

$$M_{on} = \frac{P_u}{\bar{K}} \cdot \left(\frac{1}{\bar{K}} - \frac{a}{2} \right) = \frac{64,0 \cdot 10^{-4}}{0,191} \cdot \left(\frac{1}{0,191} - \frac{32,5}{2} \right) = -0,369 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

Проверка на прочность полоски днища по формуле (4.15)

$$\sigma = \frac{H}{A_n} + \frac{|M_{on}|}{W_n} = \frac{5,694}{0,45 \cdot 1,0} + \frac{0,369 \cdot 6}{1,0 \cdot 0,45^2} = 23,6 \text{ кН/см}^2 < \\ < \gamma_c \cdot R_y = 1,0 \cdot 24,0 = 24,0 \text{ кН/см}^2 -$$

прочность плоского днища с радиальными ребрами обеспечена.

Заметим, что толщины стенки и днищ резервуара определяются зоной краевого эффекта.

Произведем расчет кольцевых швов, соединяющих кольцо жесткости с днищем и со стенкой (рис. 4.12).

Кольцевые швы, соединяющие днище с кольцом жесткости, воспринимают радиальные усилия по контуру днища $T_{\partial n}^k = \sigma_{\partial n}^k \cdot t_{\partial n}$ и результирующий момент, определяемый по формуле (4.28).

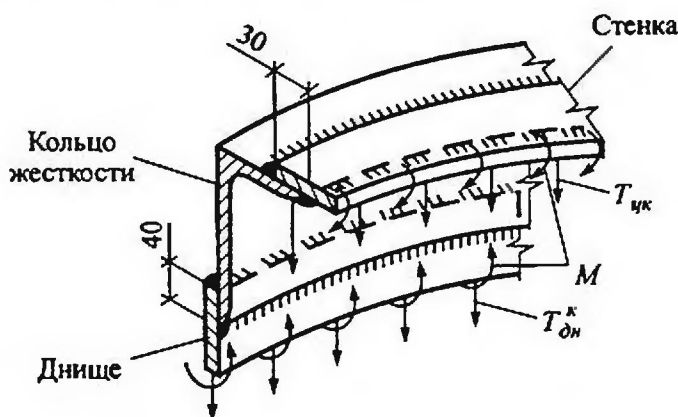


Рис. 4.12. К расчету кольцевых швов

Напряжения в кольцевом шве от $T_{\partial n}^k$

$$\tau_f^k = \frac{T_{\partial n}^k}{2 \cdot \beta_f \cdot K_f},$$

и от момента

$$\tau_{f,M} = \frac{M}{4,0 \cdot \beta_f \cdot K_f}$$

взаимно перпендикулярны; 4,0 см – расстояние между центрами сечений сварных швов (см. рис. 4.12).

Примем полуавтоматическую сварку электродной проволокой маркой Св-08А ($R_{wf} = 18,0 \text{ кН/см}^2$).

Расчетное сопротивление по металлу границы сплавления шва

$$R_{wz} = 0,45 \cdot R_{un} = 0,45 \cdot 380 = 171 \text{ МПа.}$$

Примем $K_f = 4 \text{ мм}$. Коэффициенты проплавления шва: $\beta_f = 0,7$; $\beta_z = 1,0$ – для электродной проволоки диаметром менее 1,4 мм.

Вычислим значения

$$\beta_f \cdot R_{wf} = 0,7 \cdot 18,0 = 12,6 \text{ кН/см}^2;$$

$$\beta_z \cdot R_{wz} = 1,0 \cdot 17,1 = 17,1 \text{ кН/см}^2 > \beta_f \cdot R_{wf} = 12,6 \text{ кН/см}^2.$$

Следовательно, расчетным сечением будет по металлу шва.

$$\tau_f^k = \frac{4,47 \cdot 0,5}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,4} = 4,0 \text{ кН/см}^2; \tau_{f,M} = \frac{1,185}{4,0 \cdot 0,7 \cdot 0,4} = 1,06 \text{ кН/см}^2.$$

Результирующее напряжение в шве

$$\sqrt{4,0^2 + 1,06^2} = 4,14 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot \gamma_{wf} \cdot R_{wf} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 18,0 = 18,0 \text{ кН/см}^2.$$

Кольцевые швы, которые соединяют стенку резервуара с кольцом жесткости, воспринимают усилие $T_{цк}$, результирующий момент M и сдвигающее усилие T между кольцом жесткости и стенкой от гидростатического давления жидкости $T_{ж}$ и собственного веса резервуара $T_{с.в.}$, т.е.

$$T = T_{ж} + T_{с.в.} = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot \gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot r \cdot l + \frac{G}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r},$$

где $G = 1,2 \cdot \rho_{ст} \cdot g \cdot r \cdot t_{ст} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (l + r)$;

$$T = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 1,1 \cdot 900 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 162,5 \cdot 1192,0 + \\ + \frac{1,2 \cdot 7850 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 162,5 \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot (1192,0 + 162,5)}{2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 162,5} = 0,5 \text{ кН/см.}$$

Напряжение в кольцевом шве от $T_{цк}$

$$\tau_{f,цк} = \frac{T_{цк}}{2 \cdot \beta_f \cdot K_f} = \frac{0,745}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,4} = 1,33 \text{ кН/см}^2,$$

от момента

$$\tau_{f,M} = \frac{M}{3,0 \cdot \beta_f \cdot K_f} = \frac{1,185}{3,0 \cdot 0,7 \cdot 0,4} = 1,41 \text{ кН/см}^2,$$

от сдвигающего усилия T

$$\tau_{f,T} = \frac{T}{2 \cdot \beta_f \cdot K_f} = \frac{0,5}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,4} = 0,89 \text{ кН/см}^2.$$

$$\sqrt{(\tau_{f,чк} + \tau_{f,м})^2 + \tau_{f,т}^2} = \sqrt{(1,33 + 1,41)^2 + 0,89^2} = 2,9 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot \gamma_{wf} \cdot R_{wf}.$$

В связи с большим недонапряжением можно некоторые кольцевые швы принять прерывистыми (рис. 4.4).

4.8. ПРИМЕР РАСЧЕТА КОНИЧЕСКОГО ДНИЩА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА

Горизонтальный цилиндрический резервуар $V = 100 \text{ м}^3$, радиусом $r = 162,5 \text{ см}$ может иметь избыточное давление $P_{изб}^H = 70 \text{ кПа}$, вакуум $P_{вак}^H = 2 \text{ кПа}$.

Необходимо проверить на прочность и устойчивость конические днища резервуара толщиной $t_{дн} = 5 \text{ мм}$, выполненные из стали с $R_y = 24,0 \text{ кН/см}^2$.

При расчете на прочность будем учитывать избыточное и гидростатическое давления жидкости плотностью $\rho_{ж} = 900 \text{ кг/м}^3$. Примем угол между образующей конуса и его осью (рис. 4.7) $\beta = 60^\circ$.

Суммарное гидростатическое и избыточное давление на уровне центра днища

$$P_u = \gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot r + \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}^H =$$

$$= 1,1 \cdot 900 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 162,5 + 1,2 \cdot 70,0 \cdot 10^{-4} = 100,0 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$$

Проверка на прочность днища по формуле (4.16)

$$\sigma_2 = \frac{P_u \cdot r}{t_{дн,р} \cdot \cos \beta} = \frac{100,0 \cdot 10^{-4} \cdot 162,5}{0,45 \cdot \cos 60^\circ} = 7,2 \text{ кН/см}^2 <$$

$$< \gamma_c \cdot R_{wy} = 0,8 \cdot 0,85 \cdot 24,0 = 16,32 \text{ кН/см}^2 -$$

прочность днища достаточна.

Проверка днища на устойчивость по формуле (4.17)

$$\sigma_{2,вак} \leq \gamma_c \cdot \sigma_{ср_2}.$$

$$\sigma_{2,вак} = \frac{\gamma_{f_2} \cdot P_{вак}^H \cdot r}{t_{дн,р} \cdot \cos \beta} = \frac{1,2 \cdot 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot 162,5}{0,45 \cdot 0,5} = 0,173 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma_{ср_2} = 0,495 \cdot E \cdot \frac{\sin \beta}{\cos^2 \beta} \cdot \left(\frac{t_{дн,р} \cdot \cos \beta}{0,9 \cdot r} \right)^{3/2} =$$

$$= \frac{0,495 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 0,866}{0,5^2} \cdot \left(\frac{0,45 \cdot 0,5}{0,9 \cdot 162,5} \right)^{3/2} = 2,13 \text{ кН/см}^2 > \sigma_{2,вак} -$$

устойчивость днища обеспечена.

4.9. РАСЧЕТ ОПОРНОГО КОЛЬЦА ЖЕСТКОСТИ РЕЗЕРВУАРА

В опорных сечениях стенка резервуара укрепляется кольцом жесткости, в плоскости которого размещают диафрагму в виде одного или двух горизонтальных стержней, квадрата или треугольника. Треугольные диафрагмы применяют для резервуаров объемом 50 м³ и более. При меньших объемах достаточно укреплять кольцо жесткости одним горизонтальным стержнем, располагаемым обычно на уровне верха седловой опоры.

Седловые опоры бывают с углами охвата резервуара 60°, 90° и 120°. Наиболее рациональная седловая опора с углом охвата 120° (рис. 4.13).

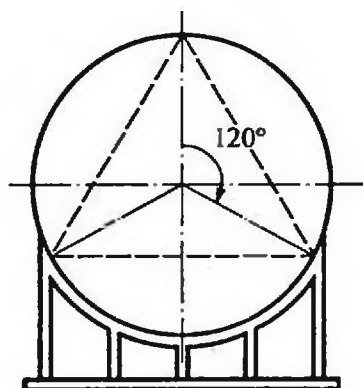


Рис. 4.13. Схема седловой опоры с углом охвата 120° и диафрагмой в виде треугольника

Ширина седловой опоры:

при $V = 20 \dots 50 \text{ м}^3 - b_c = 300 \text{ мм}$;

при $V = 60 \dots 100 \text{ м}^3 - b_c = 400 \text{ мм}$.

Рассчитывают опорное кольцо жесткости совместно с диафрагмой, как статически неопределимую систему. В сечениях кольца от собственного веса резервуара и гидростатического давления жидкости при полном заполнении резервуара возникают изгибающие моменты M_k , продольные N_k и поперечные силы Q_k . Изгибающий момент определяется по формуле [13]

$$M_k = \alpha_M \cdot \left(\gamma_{жс} \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot l \cdot r^3 + q_p \cdot \frac{l \cdot r}{\pi} \right), \quad (4.29)$$

продольное усилие по формуле

$$N_k = \alpha_N \cdot \left(\gamma_{жс} \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot l \cdot r^2 + q_p \cdot \frac{l}{\pi} \right), \quad (4.30)$$

где коэффициенты α_M и α_N определяются по рис. 4.14 для диафрагмы в виде одного горизонтального стержня и по рис. 4.15 – в виде треугольника,

$\rho_{жс}$ – плотность жидкости;

$$q_p = \frac{G}{l};$$

G – собственный вес резервуара с оборудованием.

Следует иметь в виду, что усилия, определяемые по формулам (4.29) и (4.30) приходятся на два кольца.

На прочность проверяется обушок уголка, так как конец пера уголка, приваренный к стенке, будет работать совместно со стенкой.

$$\sigma_k = \frac{N_k}{2 \cdot A_k} + \frac{M_k}{2 \cdot W_{x, \max}} \leq \gamma_c \cdot R_y, \quad (4.31)$$

где $\gamma_c = 1,0$.

Усилия M_k и N_k в формуле (4.31) должны быть со своими знаками. Сечениями уголков задаются, проверяют их и в случае надобности корректируют. Стержни диафрагм проверяют на осевые усилия (центральное сжатие или центральное растяжение), которые определяются по формуле

$$N_{cm} = \alpha_{cm} \cdot \left(\gamma_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot r^2 \cdot l + \frac{q_p \cdot l}{\pi} \right), \quad (4.32)$$

где α_{cm} — коэффициент, определяемый по рис. 4.14 или 4.15; остальные обозначения — см. п. 4.3.

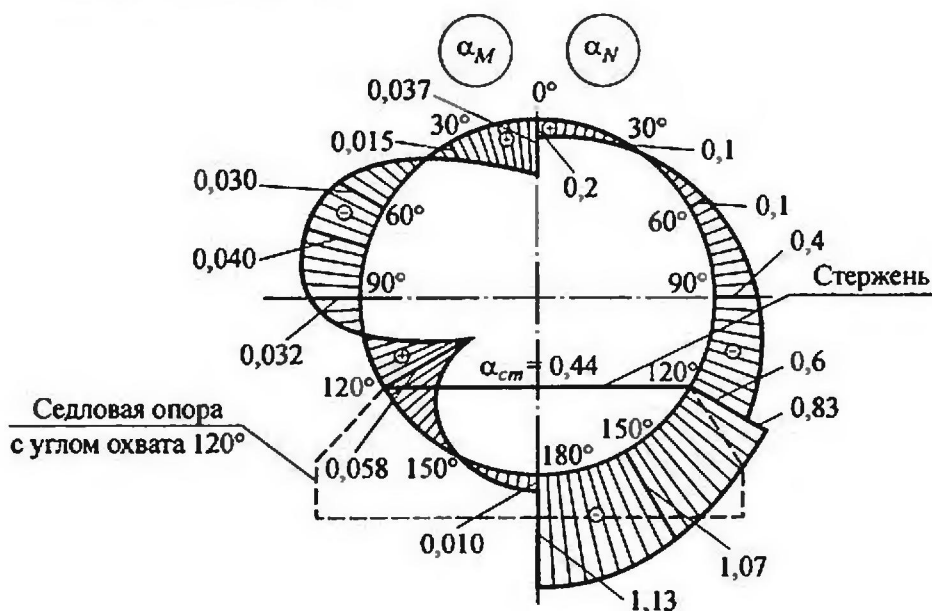


Рис. 4.14. Эпюры коэффициентов для M и N кольца, укрепленного горизонтальным стержнем

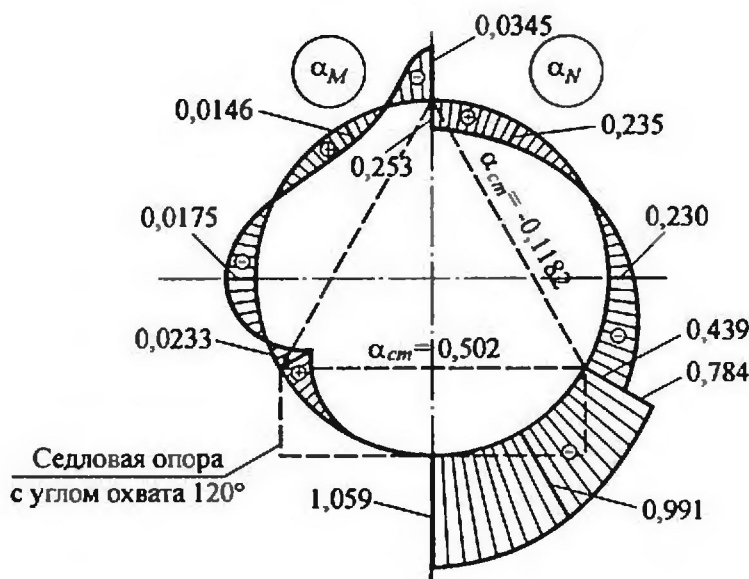


Рис. 4.15. Эпюры коэффициентов для M и N кольца, укрепленного треугольником

Сварные швы, прикрепляющие опорное кольцо жесткости к стенке, передают на кольцо сдвигающие усилия T от гидростатического давления жидкости $T_{ж}$ и веса резервуара $T_{с.в.}$.

Максимальное сдвигающее усилие T , приходящееся на два опорных кольца, находится в сечении стенки на уровне горизонтального диаметра, т.е. при $\theta = 0,5 \cdot \pi$, и определяется по формуле

$$T = T_{ж} + T_{с.в.} \quad (4.33)$$

Рассматриваемые сварные швы проверяют по металлу шва

$$\tau_f = \frac{T}{4 \cdot \beta_f \cdot K_f} \leq \gamma_c \cdot \gamma_{wf} \cdot R_{wf} \quad (4.34)$$

и по металлу границы сплавления

$$\tau_z = \frac{T}{4 \cdot \beta_z \cdot K_f} \leq \gamma_c \cdot \gamma_{wz} \cdot R_{wz}, \quad (4.35)$$

где K_f – катет сварного шва, принимаемый равным 4 мм;
 β_f и β_z – коэффициенты проплавления сварного шва.

4.10. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОПОРНОГО КОЛЬЦА ЖЕСТКОСТИ С ДИАФРАГМОЙ В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА

Требуется проверить сечение опорного кольца жесткости в виде неравнополочного уголка $100 \times 63 \times 6$ ($A_{ye} = 9,59 \text{ см}^2$; $W_{x, \min} = 14,46 \text{ см}^3$; $W_{x, \max} = 30,43 \text{ см}^3$) для резервуара радиусом $r = 162,5 \text{ см}$, длиной 1200 см , $t_{cm} = 5 \text{ мм}$, в котором хранится жидкость плотностью $\rho_{ж} = 800 \text{ кг/м}^3$. Кольцо жесткости укреплено диафрагмой в виде треугольника (стержни – из $\angle 63 \times 63 \times 5$). Днища – конические.

Опорное кольцо жесткости резервуара воспринимает нагрузку в виде собственного веса резервуара и гидростатического давления жидкости. Собственный вес порожнего резервуара с оборудованием определяется по формуле

$$G = 1,2 \cdot r \cdot t_{cm} \cdot \rho_{cm} \cdot g \cdot (2 \cdot \pi \cdot l + K_2 \cdot r) =$$

$$= 1,2 \cdot 1,625 \cdot 0,005 \cdot 7850 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 12,0 + 6,69 \cdot 1,625) = 65 \text{ кН}.$$

Равномерно распределенная нагрузка от собственного веса резервуара

$$q_p = \frac{G}{l} = \frac{65}{12} = 5,417 \text{ кН/м} = 0,05417 \text{ кН/см}.$$

Максимальный изгибающий момент в сечении кольца по формуле (4.29), используя рис. 4.15

$$M_K = \alpha_M \cdot \left(\gamma_{жс} \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot l \cdot r^3 + \frac{q_p \cdot l \cdot r}{\pi} \right) = -0,0345 \times$$

$$\times \left(1,1 \cdot 800 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 1200 \cdot 162,5^3 + \frac{0,05417 \cdot 1200 \cdot 162,5}{3,14} \right) = -1650 \text{ кН} \cdot \text{см} -$$

на два кольца.

Продольное усилие в сечении опорного кольца по формуле (4.30), применяя рис. 4.16

$$N_K = \alpha_N \cdot \left(\gamma_{жс} \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot l \cdot r^2 + \frac{q_p \cdot l}{\pi} \right) =$$

$$= 0,253 \cdot \left(1,1 \cdot 800 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 1200 \cdot 162,5^2 + \frac{0,05417 \cdot 1200}{3,14} \right) = 75 \text{ кН} -$$

на два кольца.

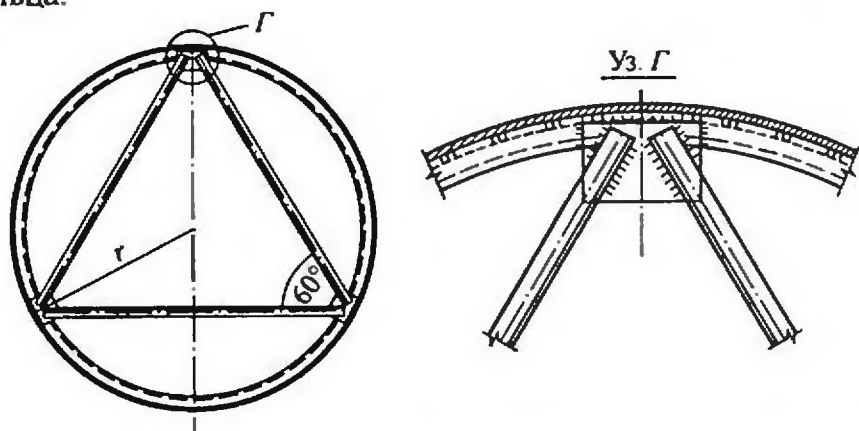


Рис. 4.16. Опорное кольцо жесткости с треугольной диафрагмой

Нормальное напряжение в сечении кольца находим по формуле (4.31)

$$\sigma_K = \frac{N_K}{2 \cdot A_{yz}} + \frac{M_K}{2 \cdot W_{x, \max}} = \left| \frac{75,0}{2 \cdot 9,59} - \frac{1650,0}{2 \cdot 30,43} \right| =$$

$$= |3,91 - 27,11| = 23,2 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_y = 1,0 \cdot 24,0 = 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Проверим на прочность и устойчивость стержни диафрагмы.

Сжимающие усилия в наклонных стержнях диафрагмы определяются по формуле (4.32)

$$N_{cm}^- = \alpha_{cm} \cdot \left(\gamma_{жс} \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot r^2 \cdot l + \frac{q_p \cdot l}{\pi} \right),$$

где $\alpha_{cm} = -0,1182$ (см. рис. 4.15);

$$q_p \cdot l = G = 65 \text{ кН}.$$

$$N_{cm}^- = -0,1182 \cdot \left(1,1 \cdot 800 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 162,5^2 \cdot 1200 + \frac{65,0}{3,14} \right) = -34,8 \text{ кН}.$$

Растягивающее усилие в горизонтальном стержне диафрагмы

$$N_{cm}^+ = \frac{0,502}{0,1182} \cdot 34,8 = 148 \text{ кН}.$$

Проверка горизонтального стержня на прочность

$$\sigma_{cm}^+ = \frac{N_{cm}^+}{2A_{y2}} = \frac{148,0}{2 \cdot 6,13} = 12,1 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_y = 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Уменьшим сечение горизонтального стержня и примем $\angle 50 \times 50 \times 5$ ($A_{y2} = 4,8 \text{ см}^2$):

$$\sigma_{cm}^+ = \frac{148,0}{2 \cdot 4,8} = 15,4 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_y.$$

Проверка наклонных стержней на устойчивость.

Длина стержня

$$l_{cm} = 2 \cdot r \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot 162,5 \cdot 0,866 = 281,5 \text{ см.}$$

Для уголка $63 \times 63 \times 5$ минимальный радиус инерции $i_{y0} = 1,25 \text{ см}$; гибкость стержня

$$\lambda = \frac{l_{cm}}{i_{y0}} = \frac{281,5}{1,25} = 225.$$

При $R_y = 24 \text{ кН/см}^2$ коэффициент продольного изгиба $\varphi = 0,13$.

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{N_{cm}^-}{2 \cdot \varphi \cdot A_{y2}} = \frac{34,8}{2 \cdot 0,13 \cdot 6,13} = 21,8 \text{ кН/см}^2 > \gamma_c \cdot R_y = \\ &= 0,75 \cdot 24,0 = 18,0 \text{ кН/см}^2 - \end{aligned}$$

устойчивость наклонных стержней диафрагмы не обеспечена.

Цифра 2 в знаменателе для σ означает, что полученные усилия в сечении стержня приходятся на два опорных кольца.

Необходимо увеличить сечение уголка и принять $\angle 90 \times 90 \times 7$ ($A_{y2} = 12,3 \text{ см}^2$; $i_{y0} = 1,78 \text{ см}$).

Гибкость $\lambda = 281,5 / 1,78 = 158$, чему соответствует $\varphi = 0,218$.

$$\sigma = \frac{34,8}{2 \cdot 0,218 \cdot 12,3} = 6,5 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_y -$$

устойчивость наклонных стержней обеспечена.

Проверим сечение наклонного стержня по предельной гибкости

$$[\lambda] = 210 - 60 \cdot \alpha,$$

$$\text{где } \alpha = \frac{34,8}{2 \cdot 0,218 \cdot 12,3 \cdot 0,75 \cdot 24,0} = 0,36 < 0,5.$$

Следует принять $\alpha = 0,5$. Тогда

$$[\lambda] = 210 - 60 \cdot 0,5 = 180 > 158,$$

т.е. сечение наклонного стержня удовлетворяет предельной гибкости.

МОКРЫЙ ГАЗГОЛЬДЕР

5.1. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
МОКРОГО ГАЗГОЛЬДЕРА

Мокрый газгольдер состоит из трех основных частей (см. рис. 1.4):

- вертикального цилиндрического резервуара, наполненного водой;
- одного или нескольких промежуточных звеньев (телескопов) – цилиндров;

- подвижного колокола, представляющего собой открытую снизу цилиндрическую оболочку с пологой сферической кровлей.

Для обеспечения подвижности частей газгольдера применяют направляющие и ролики (внешние и внутренние). Непроницаемость соединения соседних звеньев газгольдера обеспечивается гидравлическими затворами в виде двух кольцевых желобов, входящих один в другой.

Вертикальный цилиндрический резервуар (с водой) опирается на кольцевой железобетонный фундамент и песчаную подушку (с гидрофобным слоем) в центре фундамента.

К стенке резервуара снаружи крепят внешние направляющие, соединенные между собой по периметру резервуара системой связей. На внутренней поверхности стенки резервуара размещают внутренние направляющие из двутавров.

Так как резервуар газгольдера сверху открыт, то на верхнем поясе его корпуса устраивается кольцо жесткости в виде горизонтальной площадки шириной 0,8...1,2 м с рифленным настилом, удерживаемой снаружи резервуара подкосом.

На днище резервуара в радиальном направлении укладывают подкладные двутавровые балки для предотвращения присасывания подвижных частей к днищу, когда отсутствует газ в газгольдере.

Конструкция телескопа состоит из обшивки толщиной 4...5 мм и несущего каркаса в виде верхнего и нижнего колец жесткости и стоек (направляющих для роликов). Стойки привариваются к верхнему и нижнему утолщенным поясам телескопа. Кольца жесткости состоят из крайних утолщенных поясов и кольцевых желобов гидравлических затворов.

Число внутренних направляющих в резервуаре и в телескопе рекомендуется назначать равным количеству стоек под ребра покрытия в колоколе. Число внешних направляющих принимают вдвое меньше, чем внутренних. Так, например, при вместимости газгольдера $V = 10...25$ тыс. м³ число внутренних направляющих составляет 24 шт., внешних – 12 шт.; при $V = 30...50$ тыс. м³ количество внутренних направляющих принимается равным 32 шт., внешних – 16 шт.

В отличие от телескопа колокол имеет покрытие в виде ребристо-кольцевого купола с центральным кольцом. Ребра покрытия опираются на

трубчатые стойки каркаса колокола (рис. 5.1). Их диаметр назначается по гибкости, равной 150. Стойки устанавливаются внутри колокола примерно через 3...4 м, прикрепляются только к утолщенным верхнему и нижнему поясам обшивки и проверяются на сжатие при опущенных подвижных частях газгольдера. По верху ребра соединяются с окрайками кровли толщиной 8...10 мм и шириной 1,2...1,5 м. Окрайки привариваются также к уторному уголку (75×75–90×90). Верхний пояс стенки колокола, уторный уголок, окрайки кровли образуют верхнее кольцо жесткости. Вместо уторного уголка может быть законструировано кольцо жесткости из прокатных швеллеров. В многозвенных газгольдерах нижнее кольцо жесткости колокола состоит из утолщенного пояса и днища короба гидрозатвора, к которому прикреплены ролики и пригрузы. Настил кровли колокола собирается из листов толщиной 5,0 мм, которые свариваются в нахлестку. Настил свободно укладывается по ребрам и кольцам купола и приваривается сверху только к окрайкам («дышащая кровля») или приваривается к ребрам и кольцам.

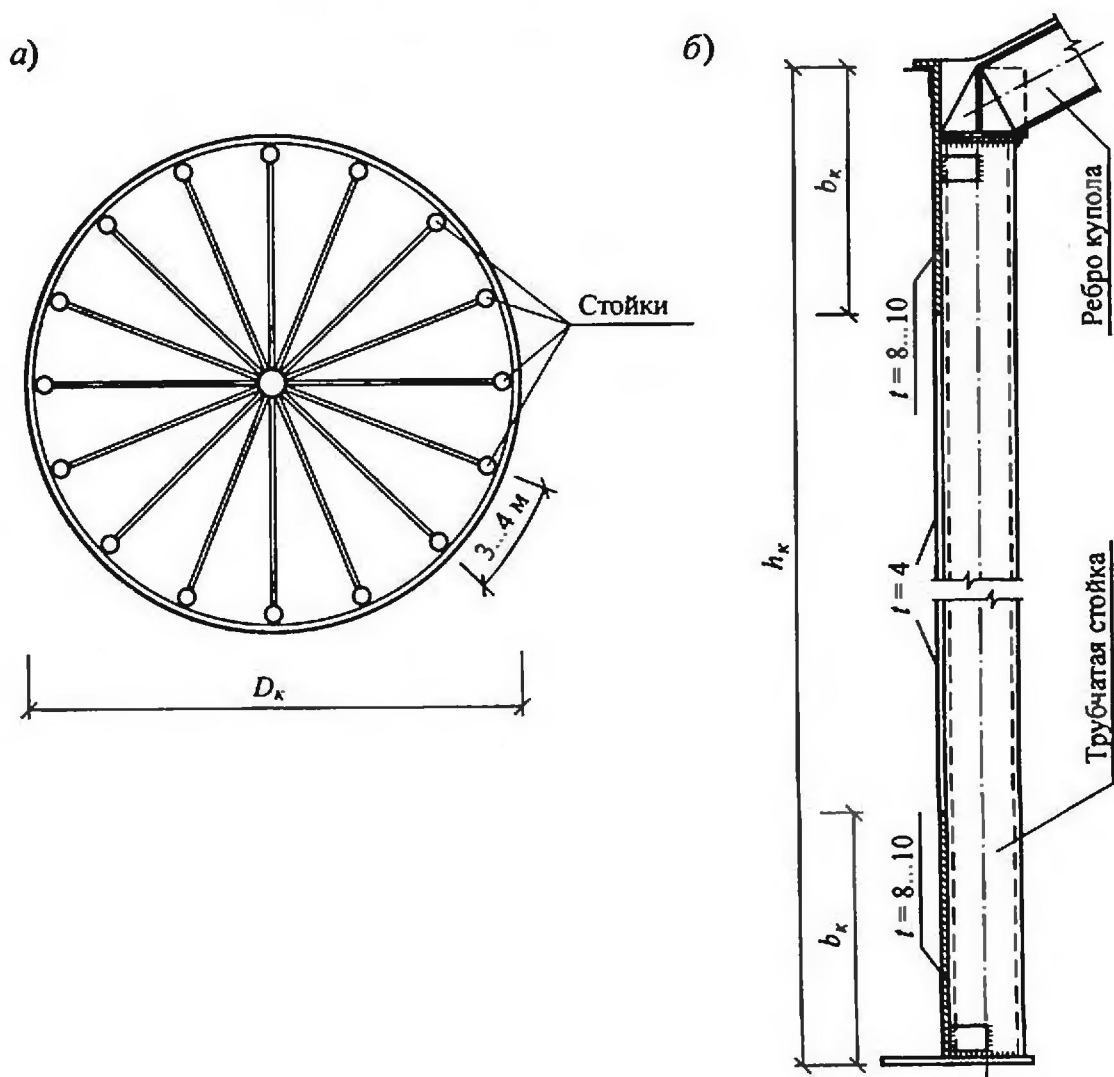


Рис. 5.1. Схемы стоек колокола:
а) схема расположения стоек в плане; б) схема стойки колокола

Для создания необходимого давления газа (5 кПа) масса подвижных звеньев недостаточна. Поэтому для уравнивания внутреннего давления газа применяют бетонные грузы, расположенные по периметру крыши колокола, а также чугунные грузы, уложенные по периметру нижней части колокола.

Плавность движения подвижных частей газгольдера обеспечивается направляющими и роликами. В газгольдерах с вертикальными направляющими верхние ролики закрепляются на консолях, прикрепленных вверх каждого подвижного звена, и перемещаются по наружным направляющим стойкам каркаса, а нижние крепятся к нижним кольцам подвижных звеньев и перемещаются по внутренним направляющим, приваренным к стенке нижерасположенного элемента.

Следует заметить, что на практике применяют еще и мокрые газгольдеры с винтовыми направляющими, которые здесь не рассматриваются.

Днище резервуара, стенки резервуара, телескопов и колокола выполняются из рулонированных заготовок на заводе.

Применяются следующие марки стали: для днища, стенок резервуара и подвижных звеньев с расчетной температурой ниже -30°C — С 255, при температуре до -30°C — С 245 (по ГОСТ 27772-88), при этом необходимы дополнительные гарантии загиба в холодном состоянии и ограничения по химическому составу. Для прочих расчетных элементов — С 235 с дополнительными гарантиями загиба в холодном состоянии.

5.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ ЧАСТЕЙ ГАЗГОЛЬДЕРА И ИХ МАСС

Так же, как и для резервуара, исходным параметром является полезная емкость газгольдера (заданный объем V).

При назначении основных размеров газгольдера, прежде всего, нужно установить количество подвижных звеньев (колокола с телескопами). При V до 6000 м^3 включительно принимают однозвенные газгольдеры (телескоп отсутствует). Газгольдеры вместимостью $10000\ldots 30000\text{ м}^3$ — являются двухзвенными (колокол и один телескоп) (см. рис. 5.2). Диаметр резервуара однозвенного газгольдера определяется приближенно по формуле

$$D_p \approx 1,45 \cdot \sqrt[3]{V}. \quad (5.1)$$

Для стенки резервуара обычно используются листы $1,5 \times 6,0\text{ м}$. Поэтому найденное значение D_p надо откорректировать так, чтобы длина развертки корпуса была бы кратной 3 м.

Диаметр колокола $D_k = D_p - 800\text{ мм}$. По диаметру колокола и заданному объему V определяется высота колокола h_k :

$$h_k = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D_k^2} + h_1, \quad (5.2)$$

где $h_1 = 0,15\ldots 0,20\text{ м}$.

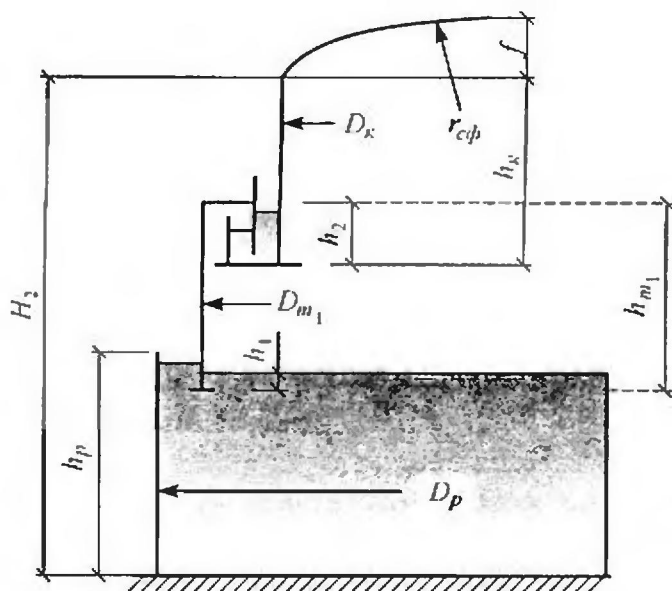


Рис. 5.2. Схема и габаритные размеры мокрого газгольдера

Высота резервуара

$$h_p = h_k + h_{нб} + (0,10...0,15), \quad (5.3)$$

где $h_{нб}$ – высота подкладных балок из прокатных двутавров, укладываемых радиально на днище резервуара ($\text{I } 20...24$, $l = 0,6...0,7$ м), через 3...4 м по окружности стенки.

Диаметр резервуара двухзвенного газгольдера (с колоколом и телескопом) определяется по приближенной формуле

$$D_p \approx 1,3 \cdot \sqrt[3]{V}, \quad (5.4)$$

и затем также уточняется для обеспечения кратности 3 м длины развертки корпуса резервуара.

Диаметр телескопа

$$D_m = D_p - 1000 \text{ мм}, \quad (5.5)$$

а диаметр колокола

$$D_k = D_m - 1100 \text{ мм}. \quad (5.6)$$

Для поясов стенки колокола, кроме крайних, используется тонколистовая сталь толщиной 4 мм и шириной 1000...1400 мм.

Высота колокола и телескопа принимается одинаковой и определяется по формуле

$$h_k = h_m = \frac{4 \cdot V + \pi \cdot D_T^2 \cdot (h_2 + h_1)}{\pi \cdot (D_k^2 + D_m^2)}, \quad (5.7)$$

где $h_2 + h_1 \approx 0,4 + P_{изб}'' / \gamma_в$,

$P_{изб}''$ – давление в газгольдере;

$\gamma_в$ – удельный вес воды.

Принимаемая высота колокола и телескопа должна соответствовать стандартной ширине толстолистовой стали (1,5 м) для крайних поясов и тонколистовой стали (1,0...1,4 м) для остальных поясов и ширине нахлестки для кольцевых швов, равной 40...60 мм.

Высота резервуара назначается по формуле (5.3).

После назначения основных размеров определяется фактическая (полезная) вместимость газгольдера по формулам:

– для однозвенного

$$V = \frac{\pi \cdot D_k^2}{4} (h_k - h_1), \quad (5.8)$$

– для двухзвенного

$$V = \frac{\pi \cdot D_k^2}{4} h_k + \frac{\pi \cdot D_k^2}{4} (h_m - h_1 - h_2). \quad (5.9)$$

Для резервуаров газгольдера в зависимости от его размеров могут применяться и низколегированные стали (14Г2, 09Г2С, 10Г2С1 и др.).

Собственный вес подвижных частей газгольдера необходимо знать для определения величины пригруза.

Основные параметры газгольдера приведены на рис. 5.2. Массы стенок колокола и телескопов можно приближенно определить по их геометрическим размерам. Покрытия колоколов и вертикальных цилиндрических резервуаров в большинстве случаев идентичны в конструктивном отношении. Поэтому представляется возможным определить массу покрытия колокола, как массу стационарного покрытия резервуара без центральной стойки, используя табл. П1.

Вес стенки колокола можно определить приближенно, используя рекомендации по назначению толщин листов стенки (рис. 5.1).

Зная высоту h_k и диаметр D_k колокола, ширину крайних обечаек b_k и толщину листов стенки (4 и 10 мм), вес стенки колокола определяют по формуле

$$G_{cm}^k = 1,1 \cdot \pi \cdot D_k \cdot [2 \cdot 0,01 \cdot b_k + 0,004 \cdot (h_k - 2 \cdot b_k)] \cdot \rho_{cm} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}, \quad (5.10)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий вес гидравлического затвора с водой в нем.

Сечение трубчатых стоек устанавливается по их предельной гибкости $[\lambda] = 150$. Требуемый радиус инерции стойки по предельной гибкости

$$i_{mp} = \frac{l_{ef}}{150},$$

где $l_{ef} \approx h_k - b_k$ – расчетная длина стойки.

По сортаменту подбирают сечение трубы (d_{mp} , t_{mp} , g_{mp} – погонная масса трубы) и проверяют на устойчивость [20] по формуле

$$\sigma = \frac{N_{cm}}{\varphi \cdot A_{cm}}, \quad (5.11)$$

где $N_{cm} = \frac{\pi \cdot D_k^2}{4 \cdot n_{cm}} \cdot (\bar{g}_{нк} + S)$ – усилие в стойке при опущенном колоколе,

n_{cm} – количество стоек в колоколе;

$\bar{g}_{нк}$ – вес 1 м² покрытия колокола.

Вес трубчатых стоек определяется по формуле

$$G_{mp}^k = 1,1 \cdot n_{cm} \cdot g_{mp} \cdot h_k \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}, \quad (5.12)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий вес верхнего кольца жесткости колокола и деталей крепления стоек;

n_{cm} – количество стоек в колоколе, равное количеству ребер покрытия колокола; рекомендуется назначать количество стоек по числу внутренних направляющих телескопа или резервуара (если нет телескопа) согласно табл. П9.

Толщину стенки трубчатой стойки следует принимать в пределах 4...8 мм. Общая масса колокола

$$Q_k = G_{cm}^k + G_{mp}^k + G_{нок}^k.$$

Аналогичным образом определяется и вес стенки телескопа с внутренними направляющими.

Вес стенки телескопа может быть найден по формуле

$$G_{cm}^m = 1,1 \cdot \pi \cdot D_m \cdot [2 \cdot 0,01 \cdot b_k + 0,004 \cdot (h_m - 2 \cdot b_k)] \cdot \rho_{cm} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}. \quad (5.13)$$

Вес внутренних направляющих телескопа определяется по формуле

$$G_{нпр}^m = 1,05 \cdot n \cdot g_{нпр} \cdot h_m \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}, \quad (5.14)$$

где 1,05 – коэффициент, учитывающий вес деталей крепления направляющих и роликов;

n – количество внутренних направляющих, принимаемых по числу стоек колокола (см. табл. П9);

$g_{нпр}$ – погонная масса внутренних направляющих в виде прокатного двутавра №20.

Общий вес телескопа с направляющими:

$$Q_m = G_{cm}^m + G_{нпр}^m.$$

5.3. РАСЧЕТ СТЕНОК ГАЗГОЛЬДЕРА

Стенка резервуара газгольдера рассчитывается на прочность по формуле (3.12). Зона краевого эффекта проверяется расчетом так же, как и обычного резервуара.

Максимальное избыточное давление газов под колоколом бывает при наивысшем его положении и определяется собственным весом подвижных

звеньев, весом затворов и воды в них, весом пригруза, плотностью воздуха и газа по формуле

$$P_{u,\max}^H = \frac{4}{\pi \cdot D_m^2} \cdot \left[Q + Q_{npz} - \frac{Q' \cdot \rho_s}{\rho_{cm}} - V \cdot g \cdot (\rho_{возд} - \rho_{газ}) \right] \leq 10 \text{ кПа}, \quad (5.15)$$

где Q – общий вес колокола, телескопа, роликов, воды в затворах, оборудования на подвижных звеньях (см. формулы (5.10), (5.12)...(5.14);

Q_{npz} – вес пригруза в виде бетонных или чугунных блоков, располагаемых на покрытии колокола по наружному краю на специальной площадке. Возможно расположение пригруза и на нижней площадке колокола;

Q' – вес погруженных в воду частей колокола и телескопа;

ρ_s , ρ_{cm} , $\rho_{возд}$ и $\rho_{газ}$ – соответственно плотности воды, стали, воздуха и газа (табл. П4);

V – объем газа внутри газгольдера.

Из формулы (5.15) можно найти величину пригруза Q_{npz} при заданном значении P_u^H .

При расчете стенки резервуара газгольдера в формуле (3.12) вместо величины $P_{изб}$ следует подставлять P_u .

Толщина стенок колокола и телескопа вычисляются по формуле

$$t = \frac{\gamma_f \cdot P_{изб}^H \cdot r_m}{\gamma_c \cdot R_{wy}}. \quad (5.16)$$

Так как давление газа под колоколом мало, то расчетные толщины стенок колокола и телескопа получаются незначительными и назначаются конструктивно 4 мм (кроме крайних поясов, у которых толщина стенки пояса принимается равной 10 мм).

Кровля колокола состоит из тонколистовой оболочки и поддерживается стержнем купольной системы. Часто применяется «дышащая» кровля, когда оболочка кровли свободно лежит на стропилах и не скрепляется с ними, а приваривается только к уторному уголку по опорному кольцу. Вследствие этого усилия от избыточного давления воспринимаются оболочкой кровли, как мембраной. Поэтому в этом случае толщина листов кровли определяется как для сферической оболочки по формуле

$$t_{кр} = \frac{\gamma_f \cdot P_{изб}^H \cdot r_{сф}}{2 \cdot \gamma_c \cdot R_{wy}}, \quad (5.17)$$

где $r_{сф}$ – радиус сферы покрытия колокола: $r_{сф} = \frac{(0,5 \cdot D_k)^2 + f^2}{2 \cdot f}$,

f – стрела подъема покрытия;

$$P_{изб}^H = P_u^H - g_{об},$$

$g_{об} = t_{кр} \cdot \rho_{cm} \cdot g$ – вес 1 м² оболочки.

При опорожнении газгольдера может возникнуть вакуум. В этом состоянии следует проверить на прочность кровлю колокола как мембрану на воздействие вакуума, собственного веса и снега по формулам (7.2)...(7.7) [17].

При назначении толщин верхних поясов резервуаров следует учитывать рекомендации по минимальным значениям, которые выработаны практикой проектирования (табл. 3.3).

5.4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ МОКРОГО ГАЗГОЛЬДЕРА

Требуется определить размеры элементов мокрого газгольдера полезной вместимостью $V = 10000 \text{ м}^3$ для хранения доменного газа при нормативном избыточном давлении $P_{изб}^H = 2,5 \text{ кПа}$ для III – снегового и I – ветрового районов.

5.4.1. Определение основных размеров газгольдера

Газгольдер емкостью 10000 м^3 принимаем двухзвенным (два подвижных звена: телескоп и колокол).

Диаметр резервуара двухзвенного газгольдера определяем по формуле (5.4):

$$D_p = 1,3 \cdot \sqrt[3]{V} = 1,3 \cdot \sqrt[3]{10000} = 28,0 \text{ м.}$$

Длина развертки стенки резервуара

$$L = \pi \cdot D_p = 3,14159 \cdot 28,0 = 87,96 \text{ м.}$$

Принимая листы размером $5995 \times 1495 \text{ мм}$, уточним длину развертки. Количество листов на один пояс стенки

$$n_{\lambda} = \frac{L}{l_{\lambda}} = \frac{87,96}{5,995} = 14,67 \text{ шт.}$$

Принимаем $n_{\lambda} = 15 \text{ шт.}$

Фактическая длина развертки стенки

$$L_{\phi} = 15 \cdot 5,995 = 89,925 \text{ м,}$$

и фактический диаметр резервуара

$$D_{\phi} = \frac{L_{\phi}}{\pi} = \frac{89,925}{3,14159} = 28,62 \text{ м.}$$

Высота колокола и телескопа определяется по формуле (5.7). Предварительно найдем диаметры телескопа по формуле (5.5):

$$D_m = D_p - 1,0 \text{ м} = 28,62 - 1,0 = 27,62 \text{ м,}$$

и колокола по формуле (5.6):

$$D_k = D_m - 1,1 \text{ м} = 27,62 - 1,1 = 26,52 \text{ м.}$$

Высота колокола, равная высоте телескопа

$$h_k = h_m = \frac{4 \cdot V + \pi \cdot D_m^2 \cdot (h_2 + h_1)}{\pi \cdot (D_k^2 + D_m^2)},$$

где $h_1 = 0,2$ м; $h_2 = 0,4 + \frac{P_{изб}''}{\gamma_в} - h_1$,

$\gamma_в$ – удельный вес воды;

при $P_{изб}'' = 2,5$ кПа $h_2 = 0,4 + \frac{2,5 \cdot 10^3}{10^4} - 0,2 = 0,45$ м;

примем $h_2 = 0,4$ м.

$$h_k = h_m = \frac{4 \cdot 10000 + 3,14 \cdot 27,62^2 \cdot (0,4 + 0,2)}{3,14 \cdot (26,52^2 + 27,62^2)} = 9 \text{ м.}$$

Уточним высоты колокола и телескопа с учетом ширины листов. Для крайних поясов примем листы шириной 1,5 м; для остальных – 1 м.

Ширина нахлестки для кольцевых швов – 40 мм. Тогда требуемое количество промежуточных поясов

$$n_{np} = \frac{9,0 - 2 \cdot 1,5}{1,00 - 0,04} = 6,25 \text{ шт.}$$

Принимаем $n_{np} = 6$ шт. Тогда общее количество поясов $n = 6 + 2 = 8$ шт. Фактическая высота колокола и телескопа

$$h_{к,ф} = h_{т,ф} = 2 \cdot 1,5 + 6 \cdot 0,96 = 8,76 \text{ м.}$$

Найдем фактический объем газгольдера по формуле (5.7):

$$V_\phi = \frac{\pi \cdot [h_{к,ф} \cdot (D_k^2 + D_m^2) - D_m^2 \cdot (h_2 + h_1)]}{4} =$$
$$= \frac{3,14 \cdot [8,76 \cdot (26,52^2 + 27,62^2) - 27,62^2 \cdot (0,4 + 0,2)]}{4} = 9958 \text{ м}^3,$$

что меньше заданного объема 10000 м^3 на 0,42%. Допускается отклонение от заданного объема до 1,0%.

Установим высоту стенки резервуара. По формуле (5.3) высота резервуара

$$h_p = h_{к,ф} + h_{нб} + 0,1 \text{ м,}$$

где $h_{нб} = 0,2$ м (± 20), тогда

$$h_p = 8,76 + 0,2 + 0,1 = 9,06 \text{ м.}$$

Принимая лист размером 5995×1495 мм, уточним высоту стенки резервуара при числе поясов

$$n_n = \frac{9,06}{1,495} = 6,1 \text{ шт.}$$

Поскольку высота стенки резервуара должна быть не менее 9,06 м, следует принять 7 шт. поясов для резервуара. При этом фактическая высота стенки резервуара составит

$$h_{p, \phi} = 7 \cdot 1,495 = 10,465 \text{ м.}$$

5.4.2. Определение веса пригруза

Вес пригруза определяем по формуле (5.15), приравнявая максимальное избыточное давление газа под колоколом заданной величине нормативного избыточного давления, т.е. $P_{u, \max}^H = P_{u36}^H = 2,5 \text{ кПа}$.

$$Q_{\text{приг}} = P_{u36}^H \cdot \frac{\pi \cdot D_m^2}{4} - Q + \frac{Q' \cdot \rho_{\text{с}}}{\rho_{\text{ст}}} + V \cdot g \cdot (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{газ}}).$$

Принимая $\rho_{\text{возд}} \approx \rho_{\text{газ}}$ и не учитывая вес погруженных в воду частей колокола и телескопа Q' из-за малости их значений, получим:

$$Q_{\text{приг}} = P_{u36}^H \cdot \frac{\pi \cdot D_m^2}{4} - Q.$$

Найдем общий нормативный вес частей газгольдера Q , т.е. без коэффициентов надежности по нагрузке

$$Q = Q_K + Q_m,$$

где Q_K – вес колокола;

$$Q_K = G_{\text{пок}}^K + G_{\text{ст}}^K + G_{\text{тр}}^K \text{ – см. формулы (5.10), (5.12);}$$

Q_m – вес телескопа;

$$Q_m = G_{\text{ст}}^m + G_{\text{нпр}}^m \text{ – см. формулы (5.13) и (5.14).}$$

Массу покрытия колокола на 1 м^3 емкости колокола определяем по табл. П1 в зависимости от диаметра колокола. При $D_K = 26,52 \text{ м}$ $g_{\text{пок}} \approx 4,5 \text{ кг/м}^3$.

Вес покрытия колокола

$$G_{\text{пок}}^K = g_{\text{пок}} \cdot V^K = g_{\text{пок}} \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D_K^2}{4} \cdot h_K = \frac{4,5 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 26,52^2 \cdot 8,76}{4} \approx 200 \text{ кН.}$$

По формуле (5.10) определим вес стенки колокола, а по формуле (5.12) – вес трубчатых стоек.

$$\begin{aligned} G_{\text{ст}}^K &= 1,1 \cdot \pi \cdot D_K \cdot [2 \cdot 0,01 \cdot b_K + 0,004 \cdot (h_K - 2 \cdot b_K)] \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = \\ &= 1,1 \cdot 3,14 \cdot 26,52 \cdot [0,02 \cdot 1,5 + 0,004 \cdot (9,0 - 2 \cdot 1,5)] \cdot 7850 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 380 \text{ кН,} \end{aligned}$$

где b_K – ширина крайних поясов колокола (см. рис. 5.1).

Вес трубчатых стоек

$$G_{\text{тр}}^K = 1,1 \cdot n \cdot g_{\text{тр}} \cdot h_K \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}.$$

Расчетная длина стойки колокола

$$l_{ef} = h_k - b_k = 9,0 - 1,5 = 7,5 \text{ м.}$$

Требуемый радиус инерции по предельной гибкости, равной 150, составляет

$$i_{mp} = \frac{l_{ef}}{150} = \frac{7,5 \cdot 10^2}{150} = 5,0 \text{ см.}$$

По сортаменту подбираем электросварную прямошовную трубу диаметром $d_{mp} = 159 \text{ мм}$, толщиной $t_{mp} = 3,5 \text{ мм}$ ($A = 17,1 \text{ см}^2$, $i_x = i_y = 5,5 \text{ см}$).
Погонная масса трубы $g_{mp} = 13,4 \text{ кг/м}$.

Количество трубчатых стоек найдем исходя из расстояния между ними по периметру колокола, примерно равного 3,5 м.

Тогда

$$n = \frac{\pi \cdot D_k}{3,5} = \frac{3,14 \cdot 26,52}{3,5} = 23,79.$$

Примем $n = 24$, кратное четырем (см. табл. П9).

Суммарный вес трубчатых стоек

$$G_{mp}^k = 1,1 \cdot 24 \cdot 13,4 \cdot 9,0 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 31 \text{ кН.}$$

По формуле (5.13) определяем вес стенки телескопа:

$$\begin{aligned} G_{cm}^m &= 1,1 \cdot \pi \cdot D_m \cdot [2 \cdot 0,01 \cdot b_k + 0,004 \cdot (h_m - 2 \cdot b_k)] \cdot \rho_{cm} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = \\ &= 1,1 \cdot 3,14 \cdot 27,62 \cdot [0,02 \cdot 1,5 + 0,004 \cdot (9,0 - 2 \cdot 1,5)] \cdot 7850 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = \\ &= 397 \text{ кН} \approx 400 \text{ кН.} \end{aligned}$$

Погонная масса внутренних направляющих телескопа из прокатного двутавра №20 $g_{инп} = 21 \text{ кг/м}$.

Вес внутренних направляющих телескопа определяем по формуле (5.14)

$$G_{инп}^m = 1,05 \cdot n \cdot g_{инп} \cdot h_m \cdot 9,81 \cdot 10^{-3},$$

где $n = 24$ – количество внутренних направляющих, принятых по числу трубчатых стоек колокола;

$$G_{инп}^m = 1,05 \cdot 24 \cdot 21 \cdot 9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 47 \text{ кН.}$$

При определении веса пригруза в формуле (5.15) будем пренебрегать весом погруженных в воду частей колокола и телескопа ввиду незначительной величины.

Относительная плотность доменного газа по воздуху $\rho_{газ}/\rho_{возд} = 0,99$ (см. табл. П4).

Вес пригруза

$$Q_{пр} = P_{изб} \cdot \frac{\pi \cdot D_m^2}{4} - Q + V \cdot \rho_{возд} \cdot g \cdot \left(1 - \frac{\rho_{газ}}{\rho_{возд}} \right),$$

где $Q = Q_k + Q_m$,

$$Q_k = G_{пок}^k + G_{ст}^k + G_{тр}^k = 200 + 380 + 31 = 611 \text{ кН};$$

$$Q_m = G_{ст}^m + G_{тр}^m = 400 + 47 \approx 450 \text{ кН};$$

$$Q = 611 + 450 = 1060 \text{ кН};$$

$$\rho_{возд} = 1,29 \text{ кг/м}^3;$$

$$V = 10000 \text{ м}^3;$$

$$Q_{нрг} = 2,5 \cdot \frac{3,14 \cdot 27,62^2}{4} - 1060 + 10000 \cdot 1,29 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,99) = 438 \text{ кН},$$

здесь последним слагаемым можно пренебрегать.

Если величина $Q_{нрг}$ окажется отрицательной, это означает, что пригруза не требуется.

5.4.3. Определение толщины листов стенки резервуара из условия прочности

Для стенки резервуара примем сталь марки ВСт3Гпс5-1 класса С 255 по ТУ 14-1-3023-80 [28], для которой $R_y = 240 \text{ МПа}$ (при $t = 11 \dots 20 \text{ мм}$) (см. табл. 1.2).

Стыковые швы листов в заводском исполнении проверяют физическими методами контроля. Поэтому $R_{шв} = R_y = 240 \text{ МПа}$.

Нагрузками для расчета стенки резервуара являются:

- гидростатическое давление воды;
- избыточное давление хранимого в газгольдере газа;
- снеговая нагрузка на покрытие колокола.

Толщину листа соответствующего пояса стенки будем определять по формуле, в которой заменим вес плавающей крыши на избыточное давление газа, т.е.

$$t \geq \frac{(\gamma_{f1} \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot x + \gamma_{f2} \cdot P_{изб}'' + S) \cdot r_p}{\gamma_c \cdot R_{шв}},$$

где $\gamma_c = 0,8$ – для всех поясов стенки, кроме нижнего, для которого $\gamma_c = 0,7$;

x – расстояние от высшего уровня воды до нижней кромки пояса;

$$r_p = D_p / 2 = 28,62 / 2 = 14,31 \text{ м}.$$

Вычислим величины, входящие в числитель рассматриваемой формулы:

$$\gamma_{f1} \cdot \rho_{ж} \cdot g = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 9,81 = 9,71 \text{ кН/м}^3;$$

$$\gamma_{f2} \cdot P_{изб}'' = 1,2 \cdot 2,5 = 3,0 \text{ кН/м}^2.$$

Для III снегового района: $S_g = 1,8 \text{ кН/м}^2$; для снега и пологого сферического покрытия: $\mu = 1,0$. Тогда

$$S = S_g \cdot \mu = 1,8 \cdot 1,0 = 1,8 \text{ кН/м}^2.$$

Подставим полученные значения в формулу:

$$t = \frac{(9,71 \cdot x + 3,0 + 1,8) \cdot 14,31}{\gamma_c \cdot 240 \cdot 10^3} = (x + 0,494) \cdot \frac{0,58 \cdot 10^{-3}}{\gamma_c}, (\text{м}).$$

Высота стенки резервуара $h_p = 10,465$ м. Стенка состоит из семи поясов, каждый шириной $b_n = 1,495$ м (5 мм – на обработку кромок).

Расчетные уровни поясов стенок:

$$\begin{aligned} x_1 &= h_p = 10,465 \text{ м;} \\ x_2 &= x_1 - b_n = 10,465 - 1,495 = 8,97 \text{ м;} \\ x_3 &= x_2 - b_n = 8,97 - 1,495 = 7,475 \text{ м;} \\ x_4 &= x_3 - b_n = 7,475 - 1,495 = 5,98 \text{ м;} \\ x_5 &= x_4 - b_n = 5,98 - 1,495 = 4,485 \text{ м;} \\ x_6 &= x_5 - b_n = 4,485 - 1,495 = 2,99 \text{ м;} \\ x_7 &= x_6 - b_n = 2,99 - 1,495 = 1,495 \text{ м.} \end{aligned}$$

Требуемые толщины листов поясов:

$$\begin{aligned} t_1 &= (10,465 + 0,453) \cdot \frac{0,58 \cdot 10^{-3}}{0,7} = 9,05 \cdot 10^{-3} \text{ м,} \\ t_2 &= (8,97 + 0,453) \cdot \frac{0,58 \cdot 10^{-3}}{0,8} = 6,83 \cdot 10^{-3} \text{ м,} \\ t_3 &= (7,475 + 0,453) \cdot \frac{0,58 \cdot 10^{-3}}{0,8} = 5,75 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \end{aligned}$$

Остальные пояса будут иметь толщину листов равную 6 мм, как минимальную (см. табл. 3.3). Принимаем толщины листов с учетом припуска на прокат и на коррозию (0,1 мм):

$$t_1 = 10 \text{ мм}; t_2 = 8 \text{ мм}; t_3 = 7 \text{ мм}; t_4 = t_5 = t_6 = t_7 = 6 \text{ мм.}$$

На устойчивость стенка резервуара мокрого газгольдера не проверяется ввиду отсутствия вакуума.

5.4.4. Определение толщины листов стенок колокола и телескопа

Толщины стенок колокола и телескопа определяем по формуле (5.16). Примем для стенок колокола и телескопа сталь марки ВСт3сп5-1 класса С 255, для которой $R_y = 240$ МПа (при $t \leq 10$ мм) (см. табл. 1.2).

$$t = \frac{\gamma_f \cdot P_{узб}'' \cdot r_m}{\gamma_c \cdot R_{wy}},$$

где $\gamma_f = 1,2$; $\gamma_c = 1,0$;

$P_{узб}'' = 2,5$ кПа;

$r_m = 27,62/2 = 13,81$ м – радиус телескопа;

$R_{wy} = R_y = 24,0$ кН/см²;

$$t = \frac{1,2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 13,81 \cdot 10^2}{1,0 \cdot 24,0} = 1,73 \cdot 10^{-2} \text{ см.}$$

Принимаем толщину листов поясов (кроме верхнего и нижнего) равной 4 мм; листы крайних поясов имеют толщину 10 мм.

5.4.5. Расчет и конструирование элементов сферического покрытия колокола

В качестве покрытия колокола принят пологий сферический купол, который несколько отличается от ранее рассмотренного купола вертикального цилиндрического резервуара. В отличие от купола вертикального резервуара купол колокола поэлементной сборки (без щитов) при частом расположении промежуточных колец, что характерно для покрытий таких сооружений. Промежуточные кольца для принятой расчетной схемы работают на внецентренное растяжение, в то время как кольца купола вертикального резервуара (при наличии щитов) – только на осевое воздействие.

Кроме того, здесь имеет место более простое сочетание нагрузок в связи с тем, что не учитывается ветровая нагрузка горизонтального направления на колокол. Рассматриваются два варианта кровли: а) кровля приварена к каркасу купола; б) «дышащая» кровля. Принято другое конструктивное решение узла опирания радиального ребра купола на опорное кольцо. Иначе говоря, рассматривается другой вариант купола.

5.4.5.1. Конструирование элементов покрытия колокола

Установим габаритные размеры сферического покрытия колокола.

Примем стрелку купола колокола

$$f = \frac{D_k}{15} = \frac{26,52}{15} = 1,77 \text{ м.}$$

Несущая конструкция покрытия – пологий ребристо-кольцевой купол с центральным кольцом. Количество радиальных ребер купола принимаем по числу трубчатых стоек колокола, т.е. 24 шт. Радиальные ребра опираются на трубчатые стойки, которые прикрепляются только к утолщенным верхнему и нижнему поясам стенок колокола.

По периметру купола располагаются окрайки кровли толщиной 8 мм и шириной 1,5 м, которые привариваются к радиальным ребрам и уторному уголку 90×90×6 (ГОСТ 8509-86).

На рис. 5.3 показан один из вариантов схемы сопряжения покрытия с каркасом стенки колокола.

Схема ребристо-кольцевого купола показана на рис. 5.4. В газгольдере кольца купола располагаются чаще, примерно на 2,2...2,6 м друг от друга по радиусу.

Радиус сферы купола

$$r_{сф} = \frac{r_k^2 + f^2}{2 \cdot f} = \frac{13,26^2 + 1,77^2}{2 \cdot 1,77} = 50,55 \text{ м.}$$

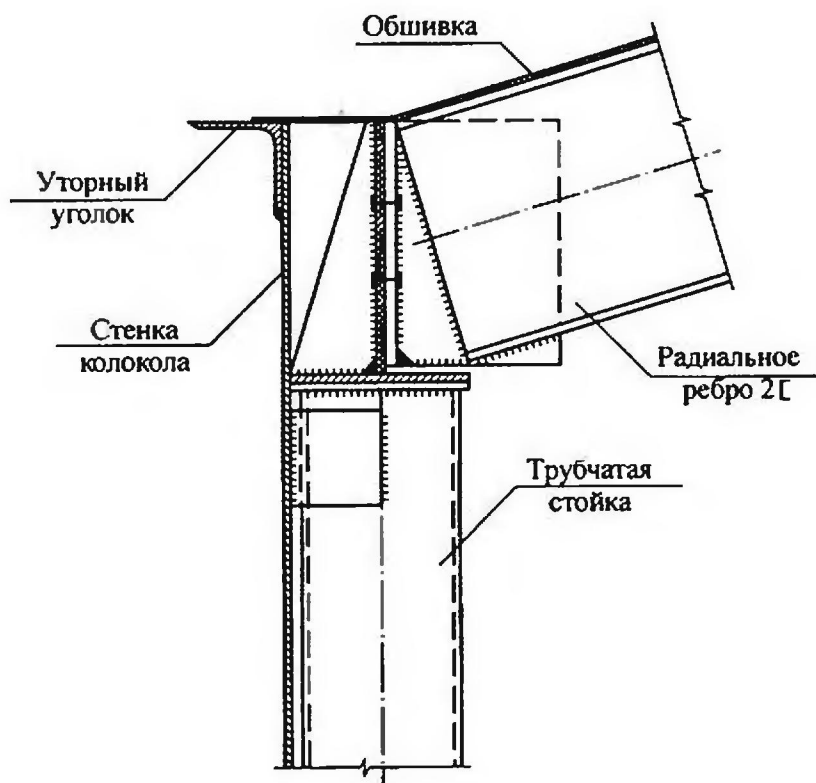


Рис. 5.3. Опорный узел покрытия

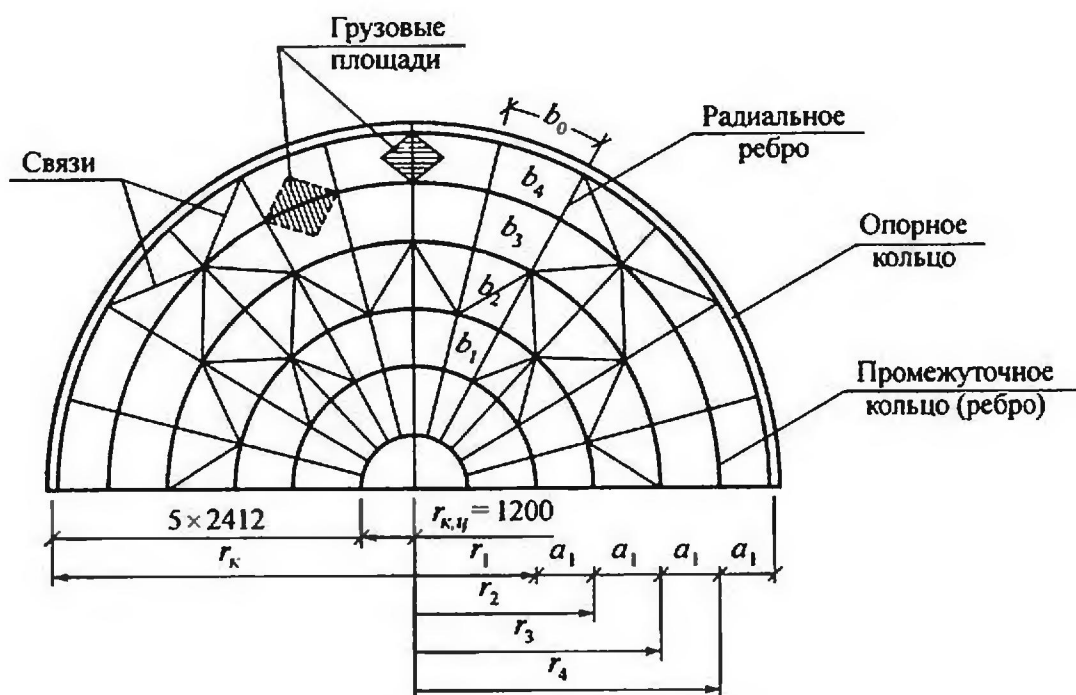


Рис. 5.4. Схема купола колокола

Центральный угол сферы купола

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{r_k}{r_{сф}} = \frac{13,26}{50,55} = 0,262,$$

отсюда $\alpha/2 = 15,2^\circ$; $\alpha = 30,4^\circ$.

Длина дуги купола в вертикальной плоскости

$$L_{кп} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{сф} \cdot \alpha}{360} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50,55 \cdot 30,4}{360} = 26,8 \text{ м.}$$

Примем радиус центрального кольца купола равным 1,2 м, а число промежуточных колец – 4 шт. Тогда расстояние между смежными кольцами по дуге окружности

$$a = \frac{\frac{L_{кп}}{2} - r_{к,ц}}{n_k + 1} = \frac{\frac{26,8}{2} - 1,2}{5} = 2,44 \text{ м,}$$

что приемлемо, так как $2,2 < a < 2,6$ м. Размер $a = 2,44$ м следует принимать по дуге окружности купола.

В плане расстояния между кольцами будут неодинаковыми, но близкими друг к другу

$$a_1 = \frac{r_k - r_{к,ц}}{5} = \frac{13,26 - 1,2}{5} = 2,412 \text{ м.}$$

Радиальные и кольцевые ребра купола завязаны между собой связями (рис. 5.4).

Настил кровли собирается из листов толщиной 4,0 мм, которые свариваются встык и укладываются свободно на радиальные и кольцевые ребра (привариваются только к окрайкам). Такое покрытие называется «дышащая кровля». Рассматривается и вариант крепления кровли к каркасу купола.

5.4.5.2. Сбор нагрузок на покрытие

Каркас купола (радиальные и кольцевые ребра) воспринимает действия внешних вертикальных нагрузок – собственного веса и снега, т.е.

$$q = \gamma_{f,кр} \cdot \bar{g}_{нок} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} + S_g \cdot \mu,$$

где $\gamma_{f,кр} = 1,05$;

$\mu = 1,0$ – для пологого купола; $S_g = 1,8 \text{ кН/м}^2$;

$$\bar{g}_{нок} = \frac{4 \cdot G_{нок}^k}{\pi \cdot D_k^2} = \frac{4 \cdot 200}{3,14 \cdot 26,52^2} = 0,36 \text{ кН/м}^2 \text{ (см. п. 5.4.2);}$$

$$q = 1,05 \cdot 0,36 + 1,8 \cdot 1,0 \approx 2,2 \text{ кН/м}^2.$$

Нагрузка от ветра на корпус газгольдера передается внешними ролями на внешние вертикальные направляющие, соединенные связями в пространственную систему. Поэтому ветровая нагрузка не учитывается при расчете радиальных и кольцевых элементов покрытия колокола.

5.4.5.3. Расчет радиального ребра купола

Предварительно вычислим его геометрические параметры (рис. 5.5).

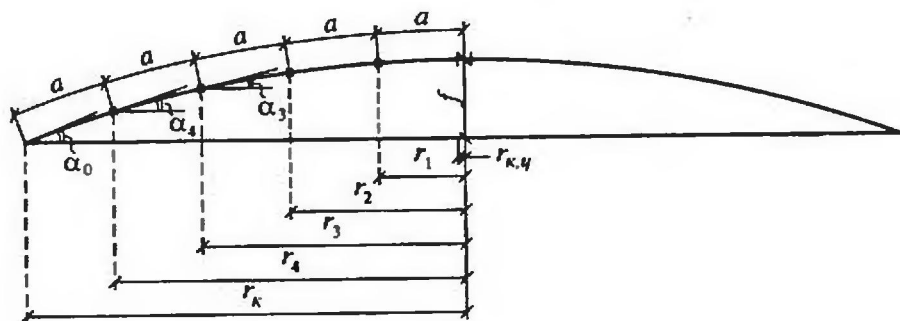


Рис. 5.5. Геометрия радиального ребра

Наибольшее усилие испытывает радиальное ребро на участке примыкания его к опорному кольцу (опорное радиальное ребро).

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{r_k}{0,5 \cdot \left(\frac{r_k^2}{f} - f \right)} = \frac{13,26}{0,5 \cdot \left(\frac{13,26^2}{1,77} - 1,77 \right)} = 0,2718 ;$$

$$\alpha_0 = 15,2^\circ ;$$

$$\operatorname{tg} \alpha_4 = \frac{r_4}{\sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{r_k^2}{f} - f \right)^2 + a_1 \cdot (2 \cdot r_k - a)}} =$$

$$= \frac{10,848}{\sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{13,26^2}{1,77} - 1,77 \right)^2 + 2,412 \cdot (2 \cdot 13,26 - 2,44)}} = 0,2187 ;$$

$$\alpha_4 = 12,34^\circ .$$

Для опорного радиального ребра средний угол наклона касательных

$$\alpha_{cp}^{on} = \frac{\alpha_0 + \alpha_4}{2} = \frac{15,2 + 12,34}{2} = 13,77^\circ .$$

Распределенная вертикальная нагрузка на опорное ребро

$$q_{p,1} = q \cdot b_0 ; \quad q_{p,2} = q \cdot b_4 ,$$

где b_0 и b_4 – см. рис. 5.4.

При радиусе колокола $r_k = D_k/2 = 26,52/2 = 13,26$ м и числе радиальных ребер $n_p = 24$, расстояние между ребрами вдоль опорного кольца

$$b_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_k}{n_p} = \frac{2 \cdot 3,14159 \cdot 13,26}{24} = 3,48 \text{ м} .$$

Аналогично определяется величина

$$b_4 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_4}{n_p},$$

где r_4 – радиус четвертого кольца покрытия, значение которого приближенно можно определить, приняв в плане расстояние между кольцами по радиусу равным a_1 . При этом $r_4 = r_{к,у} + 4 \cdot a_1 = 1,2 + 4 \cdot 2,412 = 10,848$ м;

$$b_4 = \frac{2 \cdot 3,14159 \cdot 10,848}{24} = 2,844 \text{ м.}$$

Находим интенсивность нагрузок на опорное ребро:

$$q_{p,1} = 2,2 \cdot 3,48 = 7,66 \text{ кН/м}; \quad q_{p,2} = 2,2 \cdot 2,844 = 6,26 \text{ кН/м.}$$

Опорное ребро на участке между опорным и 4-м кольцами загружено трапецидальной нагрузкой (рис. 5.6).

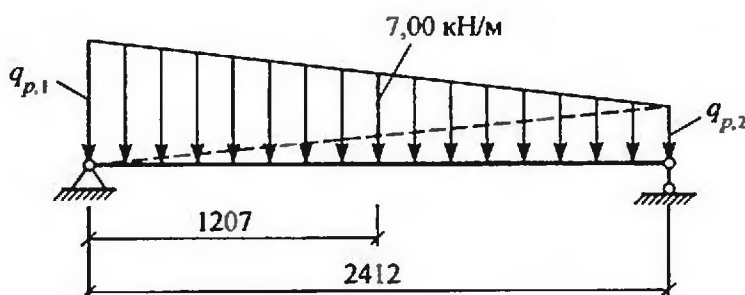


Рис. 5.6. Схема загрузки опорного ребра распределенной нагрузкой

Левая опорная реакция

$$A = \frac{\frac{1}{2} \cdot 7,66 \cdot 2,412 \cdot \frac{2}{3} \cdot 2,412 + \frac{1}{2} \cdot 6,26 \cdot 2,412 \cdot \frac{1}{3} \cdot 2,412}{2,412} = 8,68 \text{ кН.}$$

Положение сечения с наибольшим изгибающим моментом

$$x = \frac{q_{p,1} \cdot l_p}{\Delta q} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot A \cdot \Delta q}{q_{p,1}^2 \cdot l_p}} \right) = \frac{7,66 \cdot 2,412}{1,4} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 8,68 \cdot 1,4}{7,66^2 \cdot 2,412}} \right) = 1,187 \text{ м,}$$

где $\Delta q = q_{p,1} - q_{p,2} = 7,66 - 6,26 = 1,4$ кН/м.

Максимальный изгибающий момент вычисляем по формуле

$$\begin{aligned} M_{\max}^q &= A \cdot x - \frac{1}{2} \cdot q_{p,1} \cdot x \cdot \frac{2}{3} \cdot x - \frac{1}{2} \cdot 7,00 \cdot x \cdot \frac{1}{3} \cdot x = \\ &= 8,68 \cdot 1,187 - \frac{1}{2} \cdot 7,66 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1,187^2 - \frac{1}{2} \cdot 7,00 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1,187^2 = 5,06 \text{ кН·м.} \end{aligned}$$

Вертикальная сосредоточенная нагрузка на узел пересечения опорного радиального ребра с 4-м кольцом при $r_4 = 10,848$ м и $q = 2,2$ кН/м²

$$V_4 = \frac{q \cdot \pi \cdot r_4^2}{n_p} = \frac{2,2 \cdot 3,14 \cdot 10,848^2}{24} = 34,0 \text{ кН.}$$

Продольное сжимающее усилие в опорном радиальном ребре

$$N_{on}^V = \frac{V_4}{\sin \alpha_0} = \frac{34,0}{\sin 15,2^\circ} = 130 \text{ кН;}$$

$$N_{on}^q \approx \frac{q_{p,1} + q_{p,2}}{2} \cdot l_p \cdot \sin \alpha_{cp}^{on} = \frac{7,66 + 6,26}{2} \cdot 2,412 \cdot \sin 13,77^\circ = 4 \text{ кН.}$$

Суммарное продольное сжимающее усилие в опорном радиальном ребре

$$N_{on} = N_{on}^V + N_{on}^q = 130 + 4 = 134 \text{ кН.}$$

Рассматриваемое опорное ребро работает на устойчивость при внецентренном сжатии.

Рассмотрим два варианта кровли:

а) листы кровли приварены к каркасу купола;

б) «дышащая» кровля, когда листы кровли приварены только к окрайкам покрытия.

По варианту «а» кровля обеспечивает работу радиального ребра на участке между смежными кольцами купола, как стержня, шарнирно закрепленного по концам в узлах пересечения с кольцами, длиной 2,416 м.

Для каркаса купола примем сталь марки ВСтЗпсб класса С 245 по ГОСТ 380-88, для которой $R_y = 240$ МПа = 24,0 кН/см².

Учитывая относительно малую расчетную длину ($l_{ef} = 2,412$ м), радиальное ребро примем из двух спаренных прокатных уголков 80×80×8 ($A_{ye} = 12,3$ см²; $i_x = 2,44$ см; $z_0 = 2,27$ см; $J_x = 73,4$ см⁴, ГОСТ 8509-86) с зазором между ними, равным 10 мм (рис. 5.7).

Проверим принятое сечение радиального ребра на устойчивость при внецентренном сжатии. Расчетные усилия:

$$N = -134 \text{ кН; } M = 5,06 \text{ кН·м.}$$

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_e \cdot A} \leq \gamma_c \cdot R_y,$$

где $\gamma_c = 1,0$;

φ_e – коэффициент, определяемый по табл. 74 [28] в зависимости от приведенного эксцентриситета m_{ef} и условной гибкости $\bar{\lambda}$:

$$m_{ef} = \eta \cdot m = \eta \cdot \frac{M \cdot A}{N \cdot W_c}; \quad \bar{\lambda} = \frac{l_{ef}}{i_x} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}},$$

Рис. 5.7. Сечение радиального ребра из двух спаренных уголков

η – коэффициент, принимаемый по табл. 73 [28];

$m = \frac{M \cdot A}{N \cdot W_c}$ – относительный эксцентриситет,

$$A = 2 \cdot A_{yz} = 2 \cdot 12,3 = 24,6 \text{ см}^2;$$

$W_c = \frac{2 \cdot J_x}{z_0} = \frac{2 \cdot 73,4}{2,27} = 64,7 \text{ см}^3$ – момент сопротивления наиболее сжатого волокна сечения;

$$m = \frac{5,06 \cdot 10^2 \cdot 24,6}{134,0 \cdot 64,7} = 1,44;$$

$$\bar{\lambda} = \frac{241,2}{2,44} \cdot \sqrt{\frac{24,0}{2,06 \cdot 10^4}} = 3,37.$$

Отношение $A_f/A_w = 1,0$ – см. тип сечения 11 в табл. 73 [28].

При $A_f/A_w = 1,0$: $\bar{\lambda} < 5,0$; $0,1 < m < 5$.

Коэффициент $\eta = 1,8 + 0,12 \cdot m = 1,8 + 0,12 \cdot 1,44 = 1,97$.

$$m_{ef} = \eta \cdot m = 1,97 \cdot 1,44 = 2,84.$$

По табл. 74 [28] при $m_{ef} = 2,84$ и $\bar{\lambda} = 3,37 \Rightarrow \varphi_e = 0,25$.

Окончательно имеем

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_e \cdot A} = \frac{134,0}{0,25 \cdot 24,6} = 21,8 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2$$
 –

устойчивость радиального ребра обеспечена.

Вариант «б» предусматривает расчетную схему радиального ребра, приведенную в [17] на стр. 565, как двухшарнирной арки с несколькими затяжками. Для ручного счета такая расчетная схема неприемлема ввиду ее сложности.

Приближенно в запас прочности можно принять расчетную схему радиального ребра в виде трехшарнирной арки (рис. 5.8).

При этом не учитывается влияние на радиальное ребро промежуточных колец.

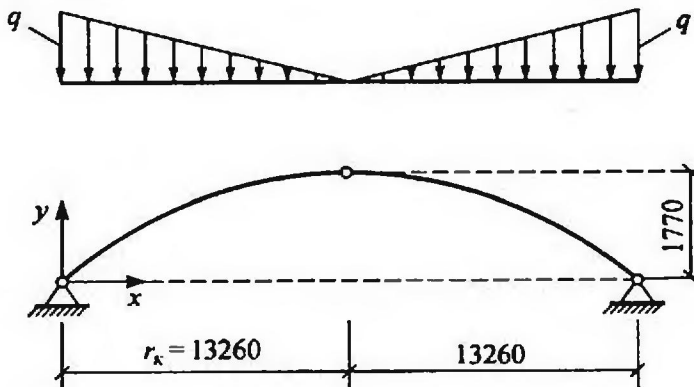


Рис. 5.8. Упрощенная расчетная схема радиального ребра

Расчетная длина трехшарнирной арки в своей плоскости

$$l_{ef} = \mu \cdot s,$$

где s — длина полуарки;

$\mu = 1,2$ при $f/l = 0,05 \dots 0,30$;

в рассматриваемом случае $\frac{f}{2r_k} = \frac{1,77}{2 \cdot 13,26} = 0,07$, что соответствует $\mu = 1,2$.

Вычислим длину полуарки по формуле

$$s = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{4 \cdot r_k^2 + \frac{16}{3} \cdot f^2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{4 \cdot 13,26^2 + \frac{16}{3} \cdot 1,77^2} = 13,42 \text{ м.}$$

Тогда

$$l_{ef} = \mu \cdot s = 1,2 \cdot 13,42 = 16,1 \text{ м.}$$

Интенсивность расчетной нагрузки на радиальное ребро у опорного кольца

$$\bar{q} = q \cdot b_0 = 2,2 \cdot 3,48 = 7,66 \text{ кН/м.}$$

Предварительно назначим сечение радиального ребра в виде двух прокатных швеллеров (рис. 3.25) по предельной гибкости $[\lambda] = 150$.

Требуемый радиус инерции

$$i_{mp} = \frac{l_{ef}}{[\lambda]} = \frac{16,1 \cdot 10^2}{150} = 10,7 \text{ см.}$$

По i_{mp} подберем из сортамента швеллер №27 ($A_{шв} = 35,2 \text{ см}^2$; $i_x = 10,9 \text{ см} > i_{mp}$; $W_x = 308 \text{ см}^3$, ГОСТ 8240-72*).

Вычислим наибольшее значение изгибающего момента и соответствующее продольное усилие в сечении арки.

Изгибающий момент в сечении арки на расстоянии x от левой опоры определяется по формуле [33]:

$$M_x = \frac{\bar{q} \cdot (2 \cdot r_k)^2}{24} [2 \cdot \xi_1 + 4 \cdot (\xi_1' - \xi_1'^3 - \xi_1 + \xi_1^3) - \eta_1],$$

где $\xi_1 = \frac{x}{2 \cdot r_k}$; $\xi_1' = 1,0 - \xi_1$;

$$\eta_1 = y/f.$$

Ордината оси арки определяется по формуле

$$y = -0,5 \cdot \left(\frac{r_k^2}{f} - f \right) + \sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{r_k^2}{f} - f \right)^2 + x \cdot (2r_k - x)}.$$

Максимальное значение момента находится в сечении, расположенном вблизи четверти пролета арки. Приведем результаты вычислений:

при $x = r_k/2 = 6,63 \text{ м}$ $M_1 = 26,9 \text{ кН} \cdot \text{м};$

при $x = 5,0 \text{ м}$ $M_2 = 32,3 \text{ кН} \cdot \text{м};$

при $x = 4,0 \text{ м}$ $M_3 = 31,8 \text{ кН} \cdot \text{м},$

которые показывают, что $M_{\max}$ находится в сечении при $x \approx 5,0$ м, т.е. $M_{\max} \approx 32,0$ кН·м.

Продольное усилие в сечении арки определяется по формуле:

$$N_p = Q_0^x \cdot \sin \alpha + H_a \cdot \cos \alpha ,$$

где Q_0^x – балочная поперечная сила в сечении x от левой опоры;

H_a – распор в арке

$$H_a = \frac{\bar{q} \cdot (2 \cdot r_k)^2}{24 \cdot f} = \frac{7,66 \cdot (2 \cdot 13,26)^2}{24 \cdot 1,77} = 127 \text{ кН};$$

α – угол наклона касательной к оси арки в сечении на расстоянии x от левой опоры, который определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r_k - x}{\sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{r_k^2}{f} - f \right)^2 + x \cdot (2r_k - x)}} .$$

При $x = 5,0$ м $\operatorname{tg} \alpha = 0,1655$, чему соответствует $\alpha = 9,4^\circ$.

Величина интенсивности нагрузки в сечении $x = 5,0$ м

$$q_x = 7,66 \cdot \frac{13,26 - 5,0}{13,26} = 4,8 \text{ кН/м}.$$

Балочная поперечная сила при $x = 5,0$ м (рис. 5.9)

$$Q_0^x = \frac{1}{2} \cdot 7,66 \cdot 13,26 - \frac{1}{2} \cdot 5,0 \cdot (7,66 + 4,8) = 19,6 \text{ кН}.$$

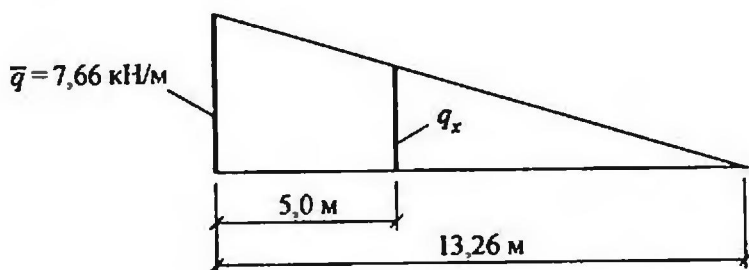


Рис. 5.9. К определению балочной поперечной силы в арке

Продольное усилие в сечении арки при $x = 5,0$ м

$$N_p = Q_0^x \cdot \sin 9,4^\circ + H_a \cdot \cos 9,4^\circ = 19,6 \cdot 0,163 + 127,0 \cdot 0,987 = 128 \text{ кН}.$$

Проверим сечение арки (радиальное ребро) на устойчивость при внецентренном сжатии по формуле

$$\sigma = \frac{N_p}{\varphi_e \cdot A} \leq \gamma_c \cdot R_y .$$

Относительный эксцентриситет

$$m = \frac{M \cdot A}{N_p \cdot W_x} = \frac{32,0 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 35,2}{128,0 \cdot 2 \cdot 308} = 2,86.$$

Условная гибкость

$$\bar{\lambda} = \frac{l_{ef}}{i_x} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{1610}{10,9} \cdot \sqrt{\frac{24,0}{2,06 \cdot 10^4}} = 5,04.$$

Для принятого швеллера №27: $b = 95$ мм; $d = 6$ мм; $t_f = 10,5$ мм.

Отношение A_f/A_w согласно типу сечения 5 [28] табл. 73:

$$\frac{b \cdot t_f}{(h - 2 \cdot t_f) \cdot d} = \frac{9,5 \cdot 1,05}{(27,0 - 2 \cdot 1,05) \cdot 0,6} = 0,7.$$

Примем $A_f/A_w \approx 1,0$. Тогда согласно табл. 73 [28] при $m < 5$ и $\bar{\lambda} = 5,04$ коэффициент

$$\begin{aligned} \eta &= 1,90 - 0,1 \cdot m - 0,02 \cdot (6,0 - m) \cdot \bar{\lambda} = \\ &= 1,90 - 0,1 \cdot 2,86 - 0,02 \cdot (6,0 - 2,86) \cdot 5,04 = 1,3. \end{aligned}$$

Приведенный относительный эксцентриситет

$$m_{ef} = \eta \cdot m = 1,3 \cdot 2,86 = 3,72.$$

По табл. 74 [28] при $m_{ef} = 3,72$ и $\bar{\lambda} = 5,04 \Rightarrow \varphi_e = 0,15$.

Проверка сечения по формуле

$$\sigma = \frac{N_p}{\varphi_e \cdot A} = \frac{128,0}{0,15 \cdot 2 \cdot 35,2} = 12,1 \text{ кН/см}^2 < 23,5 \text{ кН/см}^2 -$$

большое недонапряжение.

Однако уменьшать сечение ребра нельзя, поскольку тогда гибкость радиального ребра превысит предельное значение для принятой расчетной схемы. Если провести расчет радиального ребра по более точной расчетной схеме (с учетом влияния промежуточных колец), то сечение ребра можно уменьшить.

5.4.5.4. Расчет и конструирование опорного кольца покрытия колокола

Опорное кольцо рассчитывается:

- 1) на растяжение от распоров радиальных ребер при действии вертикальной нагрузки сверху вниз $q = 2,2$ кН/м²;
- 2) на сжатие с учетом реакции радиальных ребер на вертикальную нагрузку снизу вверх

$$q_{1, \text{кр}} = \gamma_{f, \text{изб}} \cdot P_{\text{изб}}^n + \gamma_{f, \text{с}} \cdot w_m^{\text{ом}} - 0,9 \cdot \bar{g}_{\text{пок}},$$

где $\gamma_{f,uzb} = 1,2$; $\gamma_{f,g} = 1,4$;

$$P_{uzb}^H = 2,5 \text{ кН/м}^2;$$

$$w_m^{om} = w_0 \cdot \kappa_0 \cdot c_{e_2},$$

$$w_0 = 0,23 \text{ кН/м}^2;$$

$$c_{e_2} = -0,8 \text{ при } \frac{H_{z3}}{D_m} = \frac{26,58}{27,62} \approx 1,0 \text{ и } \frac{f}{D_\kappa} = \frac{1,77}{26,52} = 0,0667 < 1,0 \text{ [26];}$$

$$\bar{g}_{нок} = 0,36 \text{ кН/м}^2 \text{ (см. п. 5.4.5.2).}$$

Полная высота наполненного газом газгольдера

$$H_{z3} = h_p + h_m + h_\kappa = 9,06 + 8,76 + 8,76 = 26,58 \text{ м.}$$

При $z = H_{z3} = 26,58 \text{ м}$ для местности типа В коэффициент $\kappa_0 = 0,949$.

Тогда

$$w_m^{om} = 0,23 \cdot 0,949 \cdot (-0,8) = -0,175 \text{ кН/м}^2.$$

Вертикальная нагрузка снизу вверх

$$q_{1,kr} = 1,2 \cdot 2,5 + 1,4 \cdot 0,175 - 0,9 \cdot 0,36 = 2,92 \text{ кН/м}^2.$$

Во втором слагаемом знак «-» опущен и учтено направление снизу вверх как положительное.

В отличие от расчета опорного кольца сферического покрытия резервуара здесь не учитываются изгибающие моменты и продольные силы от ветровых нагрузок на стенку колокола. Нагрузки от ветра на корпус газгольдера передаются внешними роликами на внешние вертикальные направляющие [7], [20].

Определим усилия в опорном кольце по первому варианту загрузки.

Момент под радиальным ребром

$$M_{\max} = -\frac{P \cdot r_\kappa}{2} \cdot \left(\frac{n_p}{\pi} - \operatorname{ctg} \frac{180^\circ}{n_p} \right),$$

$$\text{где } P = \frac{\pi \cdot r_\kappa^2 \cdot q}{n_p} \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0,$$

$\alpha = 15,2^\circ$ – см. п. 5.4.5.3 и рис. 5.5;

$n_p = 24$ шт. – количество радиальных ребер в куполе.

$$\text{Распор — } P = \frac{3,14 \cdot 13,26^2 \cdot 2,2 \cdot 3,68}{24} = 186 \text{ кН.}$$

$$M_{\max} = -\frac{186,0 \cdot 13,26}{2} \cdot \left(\frac{24}{3,14159} - \operatorname{ctg} \frac{180^\circ}{24} \right) = -53,7 \text{ кН·м.}$$

Знак «-» означает, что у опорного кольца растянуты внешние волокна.

Продольное усилие в опорном ребре

$$N_p = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n_p}} = \frac{186}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{24}} = 713 \text{ кН.}$$

Момент между радиальными ребрами

$$M_{cp} = \frac{P \cdot r_k}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n_p}} - \frac{n_p}{\pi} \right) = \frac{186,0 \cdot 13,26}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{24}} - \frac{24}{3,14159} \right) = 26,7 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Если учесть только изгибающий момент $M_{\max}$, то требуемый момент сопротивления сечения опорного кольца будет:

$$W_{mp} = \frac{M_{\max}}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{53,7 \cdot 10^2}{1,0 \cdot 24,0} = 224 \text{ см}^3.$$

Очевидно, что при значении $M_{\max} = 53,7 \text{ кН} \cdot \text{м}$ и $N_p = 713 \text{ кН}$ сечение опорного кольца, которое изображено на рис. 5.3, явно будет недостаточно. Поэтому сечение опорного кольца следует принять более мощным. При этом необходимо учитывать условие примыкания радиального ребра, наличие трубчатых стоек стенки колокола, герметичность кровли. Примем конструкцию сечения опорного кольца с учетом указанных требований, как показано на рис. 5.10.

Вычислим геометрические характеристики сечения опорного кольца.
Сечение кольца

$$A_k = 10,6 + (29,0 + 22,0 + 28,0 + 21,0) \cdot 1,0 = 110,6 \text{ см}^2.$$

Положение центра тяжести сечения кольца относительно оси, совмещенной с наружной поверхностью стенки колокола

$$x_0 = \frac{-10,6 \cdot 2,43 + 1,0 \cdot 29,0 \cdot 0,5 + 1,0 \cdot 28,0 \cdot (8,0 + 1,0) + 1,0 \cdot 21,0 \cdot \left(\frac{21,0}{2} + 1,0 \right)}{110,6} = 4,4 \text{ см.}$$

Момент инерции сечения относительно оси у-у, проходящей через центр тяжести

$$J_y = 82,1 + 10,6 \cdot (2,43 + 4,4)^2 + 1,0 \cdot 29,0 \cdot (4,4 - 0,5)^2 + 1,0 \cdot 28,0 \cdot (8,0 + 1,0 - 4,4)^2 + \frac{1,0 \cdot 22,0^3}{12} + 1,0 \cdot 22,0 \cdot 4,4^2 + \frac{1,0 \cdot 21,0^3}{12} + 1,0 \cdot 21,0 \cdot \left(\frac{21,0}{2} + 1,0 - 4,4 \right)^2 = 4754 \text{ см}^4.$$

Расстояния от оси у-у до крайних точек сечения А и Б:

$$x_A = 11,0 + 4,4 = 15,4 \text{ см; } x_B = 21,0 + 1,0 - 4,4 = 17,6 \text{ см.}$$

Моменты сопротивления:

$$W_{y,A} = \frac{J_y}{x_A} = \frac{4754,0}{15,4} = 309 \text{ см}^3; \quad W_{y,B} = \frac{J_y}{x_B} = \frac{4754,0}{17,6} = 270 \text{ см}^3.$$

Проверим сечение кольца на прочность по нормальным напряжениям:

$$\sigma_A = \frac{N_p}{A_k} + \frac{M_{\max}}{W_{y,A}} = \frac{713,0}{110,6} + \frac{53,7 \cdot 10^2}{309,0} = 23,8 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_y = 24,0 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma_B = \frac{N_p}{A_k} + \frac{M_{cp}}{W_{y,B}} = \frac{713,0}{110,6} + \frac{26,7 \cdot 10^2}{270,0} = 16,3 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_y = 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность опорного кольца обеспечена.

Принятое сечение опорного кольца проверим на прочность как сжато-изогнутого элемента по второму варианту загрузки.

Вертикальная нагрузка снизу вверх

$$q_{1,kr} = 2,92 \text{ кН/м}^2.$$

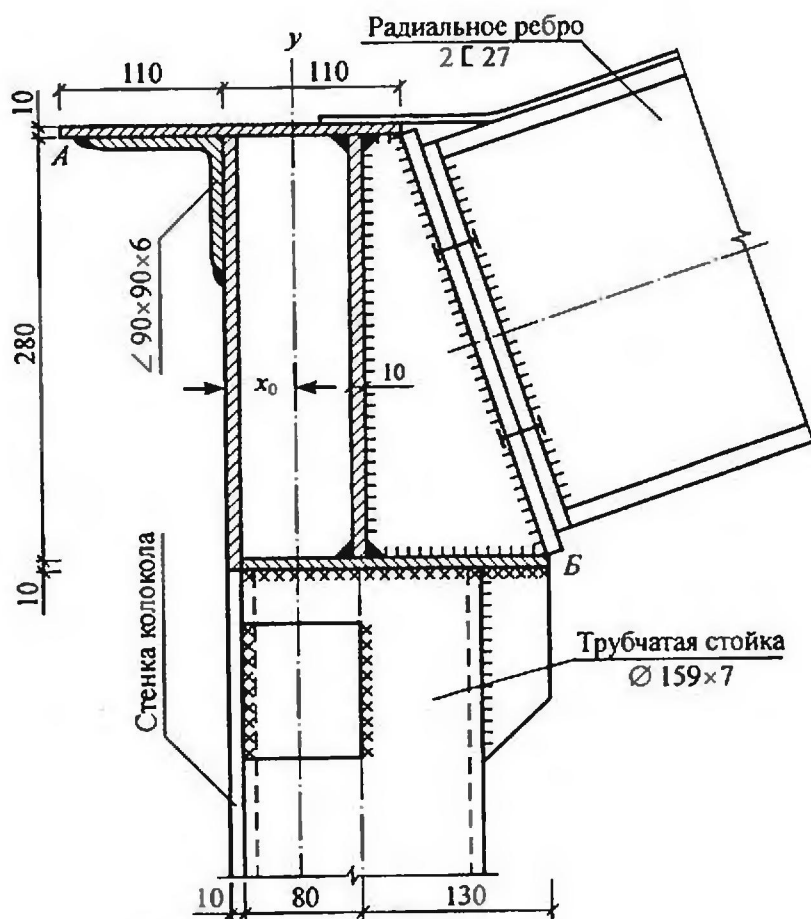


Рис. 5.10. Узел опирания радиального ребра на опорное кольцо (сечение опорного кольца заштриховано)

Угол наклона касательной к оси арки с горизонталью у опорного кольца (см. рис. 5.5) $\alpha_0 = 15,2^\circ$. Тогда распределенная нагрузка на опорное кольцо

$$P_1 = \frac{q_{1,кп} \cdot r_{сф}}{2} \cdot \cos \alpha_0,$$

где $r_{сф} = \frac{r_k^2 + f^2}{2 \cdot f} = 50,55$ м – радиус сферы покрытия колокола;

$$P_1 = \frac{2,92 \cdot 50,55}{2} \cdot \cos 15,2^\circ = 71,2 \text{ кН/м.}$$

Реакция радиального ребра

$$X = \frac{P_1 \cdot r_k^2}{\frac{n_p \cdot r_k}{2 \cdot \pi} + E \cdot A_k \cdot \delta_{11}},$$

где $A_k = 110,6 \text{ см}^2$;

δ_{11} – радиальное перемещение конца радиального ребра от распора $X = 1$;

приближенно $\delta_{11} \approx \frac{16}{15} \cdot \frac{f^2 \cdot r_k}{E \cdot J_{x,pp}}$ [7],

$J_{x,pp}$ – момент инерции сечения радиального ребра из двух прокатных швеллеров №27, т.е. $J_{x,pp} = 2 \cdot 4160 = 8320 \text{ см}^4$;

$$\delta_{11} \approx \frac{16}{15} \cdot \frac{1,77^2 \cdot 10^4 \cdot 13,26 \cdot 10^2}{E \cdot 8320} = \frac{5,33 \cdot 10^3}{E};$$

$$X = \frac{71,2 \cdot 10^{-2} \cdot 13,26^2 \cdot 10^4}{\frac{24 \cdot 13,26 \cdot 10^2}{2 \cdot 3,14} + 110,6 \cdot 5,33 \cdot 10^3} = 2,1 \text{ кН.}$$

Сжимающее усилие в опорном кольце

$$N_{1,к} = -P_1 \cdot r_k + \frac{X \cdot n_p}{2 \cdot \pi} = -71,2 \cdot 13,26 + \frac{2,1 \cdot 24}{2 \cdot 3,14} = -936 \text{ кН.}$$

Момент в кольце под радиальным ребром

$$M_{1,маx} = \frac{X \cdot r_k}{2} \left(\frac{n_p}{\pi} - \operatorname{ctg} \frac{180^\circ}{n_p} \right) = \frac{2,1 \cdot 13,26}{2} \cdot \left(\frac{24}{3,14159} - \operatorname{ctg} \frac{180^\circ}{24} \right) = 0,6 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Проверка опорного кольца на сжатие с изгибом на прочность:

$$\sigma_k = \frac{N_{1,к}}{A_k} + \frac{M_{1,маx}}{W_{y,б}} = \frac{936,0}{110,6} + \frac{0,6 \cdot 10^2}{270,0} = 8,7 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_y -$$

прочность опорного кольца при втором варианте загрузки обеспечена.

Опорное кольцо покрытия колокола не проверяется на устойчивость, так как оно связано через верхние ролики с внешними направляющими газ-гольдера.

5.4.5.5. Расчет и конструирование промежуточного кольца покрытия

Рассмотрим промежуточное кольцо (4-е), смежное с опорным. Среди всех промежуточных колец оно является наиболее напряженным.

Для определения усилий в 4-м кольце потребуются величины углов α_4 и α_3 (см. рис. 5.5). $\alpha_4 = 12,34^\circ$ – см. п. 5.4.5.3.

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{r_3}{\sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{r_k^2}{f} - f \right)^2 + 4 \cdot a_1 \cdot (r_k - a_1)}}$$

где $a_1 = 2,412$ м; $r_3 = r_k - 2 \cdot a_1 = 13,26 - 2 \cdot 2,412 = 8,436$ м.

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{8,436}{\sqrt{0,25 \cdot \left(\frac{13,26^2}{1,77} - 1,77 \right)^2 + 4 \cdot 2,412 \cdot (13,26 - 2,412)}} = 0,169;$$

$$\alpha_3 = 9,6^\circ.$$

При определении продольного усилия в 4-м кольце предполагается частичное загрузление покрытия колокола снегом на кольце вне площади S_3 (в незаполненном газгольдере).

Продольное сжимающее усилие в 4-м кольце при таком загрузлении определяется по формуле

$$N_{\kappa,4} = -\frac{1}{2 \cdot \sin \frac{180^\circ}{n_p}} (N_4 \cdot \cos \alpha_4 - N_3 \cdot \cos \alpha_3),$$

$$\text{где } N_4 = \frac{\gamma_{f, \kappa p} \cdot \bar{g}_{\text{пок}} \cdot S_3 + q \cdot (S_4 - S_3)}{n_p \cdot \sin \alpha_4}; \quad N_3 = \frac{\gamma_{f, \kappa p} \cdot \bar{g}_{\text{пок}} \cdot S_3}{n_p \cdot \sin \alpha_3},$$

$$\bar{g}_{\text{пок}} = 0,36 \text{ кН/м}^2 \text{ – см. п. 5.4.5.2;}$$

$$S_3 = \pi \cdot r_3^2 = 3,14 \cdot 8,436^2 = 223 \text{ м}^2 \text{ – грузовая площадь покрытия радиусом } r_3;$$

$$S_4 = \pi \cdot r_4^2 = 3,14 \cdot 10,848^2 = 370 \text{ м}^2 \text{ – грузовая площадь покрытия радиусом } r_4.$$

Подставляя числовые значения в формулы, получим

$$N_4 = \frac{1,05 \cdot 0,36 \cdot 223 + 2,2 \cdot (370 - 223)}{24 \cdot \sin 12,34^\circ} = 80 \text{ кН;}$$

$$N_3 = \frac{1,05 \cdot 0,36 \cdot 223}{24 \cdot \sin 9,6^\circ} = 21 \text{ кН;}$$

$$N_{\kappa,4} = -\frac{1}{2 \cdot \sin \frac{180^\circ}{24}} \cdot (80 \cdot \cos 12,34^\circ - 21 \cdot \cos 9,6^\circ) = -220 \text{ кН.}$$

Сечение кольца установим из условия обеспечения его устойчивости в своей плоскости.

Требуемый момент инерции сечения кольца

$$J_{\kappa}^{mp} = \frac{N_{\kappa,4} \cdot r_4^2}{3 \cdot E} = \frac{220,0 \cdot 10,848^2 \cdot 10^4}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^4} = 4189 \text{ см}^4.$$

Примем сечение кольца из двух прокатных неравнополочных уголков узкими полками вместе по схеме «б» (ГОСТ 8510-73^{*}): 2 $\angle 180 \times 110 \times 12$ ($A_{yx} = 33,7 \text{ см}^2$; $i_6 = 8,67 \text{ см}$ при зазоре между уголками равном 10 мм). Момент инерции принятого сечения кольца

$$J_{\kappa} = 2 \cdot 33,7 \cdot 8,67^2 = 5066 \text{ см}^4 > J_{\kappa}^{mp} = 4189 \text{ см}^4.$$

Из своей плоскости кольцо испытывает местные изгибающие моменты, которые определяются как в простой балке (рис. 5.11) пролетом, равным расстоянию между соседними радиальными ребрами на уровне рассматриваемого кольца.

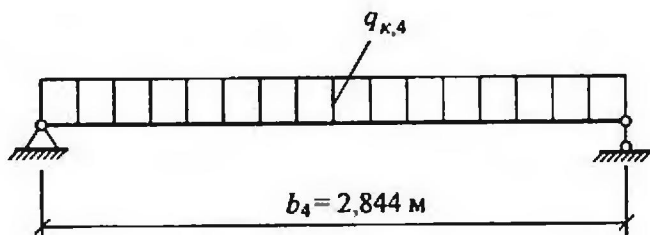


Рис. 5.11. Схема нагружения кольца местной нагрузкой

Интенсивность нагрузки на кольцо

$$q_{\kappa,4} = q \cdot a_1 = 2,2 \cdot 2,412 = 5,31 \text{ кН/м},$$

где $q = 2,2 \text{ кН/м}^2$ – см. п. 5.4.5.2;

$a_1 = 2,412 \text{ м}$ – см. п. 5.4.5.1.

Максимальный изгибающий момент

$$M = \frac{q_{\kappa,4} \cdot b_4^2}{8} = \frac{5,31 \cdot 2,844^2}{8} = 5,37 \text{ кН·м}.$$

Проверим принятое сечение кольца на прочность из своей плоскости по формуле

$$\sigma = \frac{N_{\kappa,4}}{A_{\kappa}} + \frac{M}{W_x} \leq \gamma_c \cdot R_y,$$

где $A_{\kappa} = 2 \cdot 33,7 = 67,4 \text{ см}^2$;

$$W_x = 2 \cdot \frac{J_y}{b - x_0},$$

$J_y = 324 \text{ см}^4$, $b = 110 \text{ мм}$, $x_0 = 2,52 \text{ см}$ – из сортамента;

$$W_x = 2 \cdot \frac{324,0}{11,0 - 2,52} = 76,4 \text{ см}^3.$$

$$\sigma = \frac{220,0}{67,4} + \frac{5,37 \cdot 10^2}{76,4} = 10,3 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_y -$$

прочность кольца из своей плоскости обеспечена. Большое недонапряжение объясняется тем, что сечение кольца определено из условия устойчивости его в своей плоскости при «дышащей кровле».

СУХИЕ ГАЗГОЛЬДЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО ОБЪЕМА

6.1. СУХОЙ ГАЗГОЛЬДЕР ПОРШНЕВОГО ТИПА

Сухие газгольдеры рассматриваемого типа относят к газгольдерам переменного объема и низкого постоянного давления ($P_{изб}'' \leq 5,0$ кПа). Они более экономичны по расходу стали на 1 м^3 хранимого газа в сравнении с мокрыми газгольдерами. Основным недостатком сухих газгольдеров поршневого типа является сложность, трудоемкость и высокая стоимость эксплуатации. Поршневые газгольдеры могут достигать больших размеров ($V = 100000 \text{ м}^3$ и более).

Сухой газгольдер поршневого типа состоит из следующих основных частей (рис. 6.1):

- цилиндрической стенки;
- днища;
- покрытия;
- поршня (шайбы);
- затвора.

Стенку и днище газгольдера изготавливают из рулонных заготовок толщиной $4 \dots 5$ мм. Стенка имеет каркас из вертикальных стоек ($\text{I } 18 \dots 22$), заделанных в кольцевой железобетонный фундамент, и горизонтальных колец из прокатных уголков $100 \times 100 \times 10$ или швеллера №10. Днище существенно не отличается от днища мокрого газгольдера.

Покрытие сухого газгольдера состоит из несущего каркаса в виде гнутых по радиусу стропил (двутаавры или швеллеры), между которыми ставят распорки из швеллеров. По стропилам укладывают настил из тонколистовой стали толщиной $3 \dots 4$ мм и крепят проплавным швом. По периметру кровли располагают кольцевую окрайку из листов толщиной 6 мм, воспринимающую совместно с опорным кольцом распоры от стропил (рис. 6.2). Возможны и другие конструктивные решения покрытий газгольдеров (например, щитовое).

Поршень имеет несущий каркас в виде сферы и обшивку из листовой стали. Несущий каркас в виде пространственной системы, состоящей из радиально расположенных стальных ребер с кронштейнами на концах, имеющих по два ролика, скользящих по вертикальным стойкам стенки, и обшивки из листов толщиной $4 \dots 5$ мм. Принцип конструирования каркаса поршня аналогичен конструированию покрытия; имеет опорное кольцо, радиально расположенные ребра, изогнутые по дуге окружности со стрелой подъема $f \approx (1/11) \cdot D_r$, распорки в кольцевом направлении и обшивку толщиной $4 \dots 5$ мм (рис. 6.3). Опорное кольцо, как правило, конструируют из сварного двутавра. Над опорным кольцом располагается стойка кронштейна из прокатного швеллера №14...18 длиной, примерно, $(1/6) \cdot D_r$ для

1-1

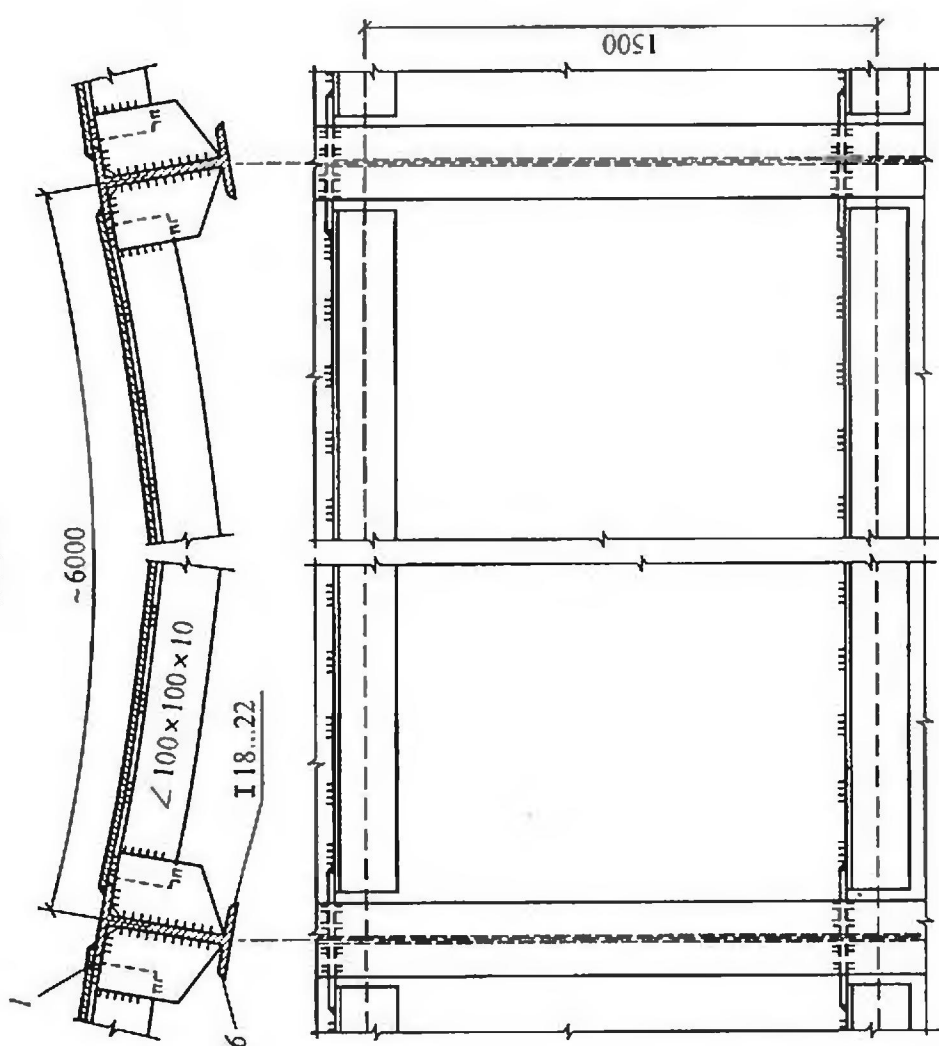
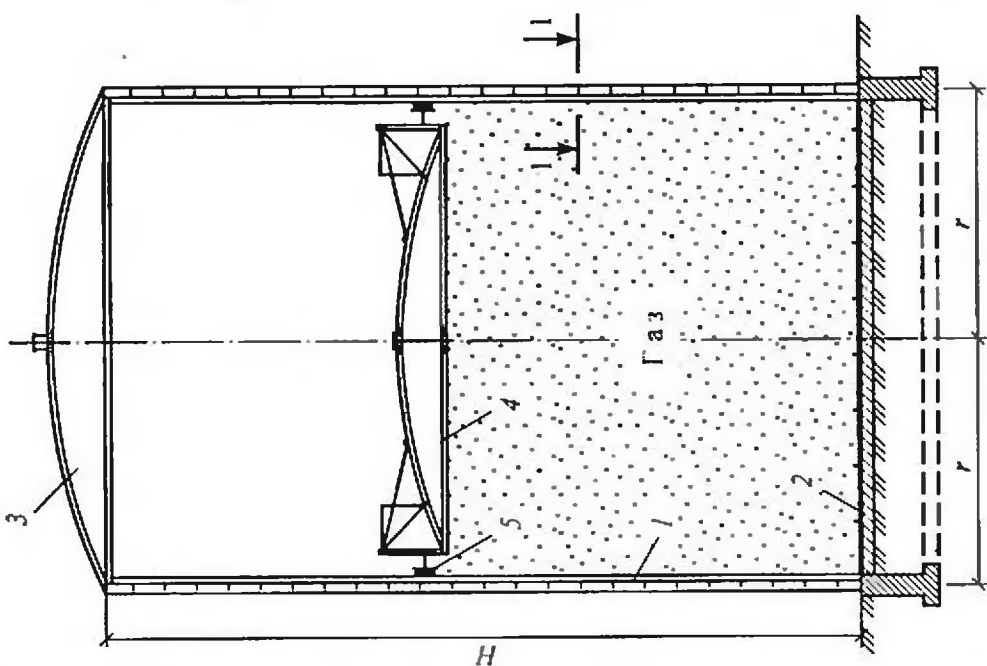


Рис. 6.1. Общий вид сухого газгольдера поршневого типа:

1 – стенка; 2 – днище; 3 – покрытие; 4 – поршень; 5 – затвор; 6 – каркас стенки

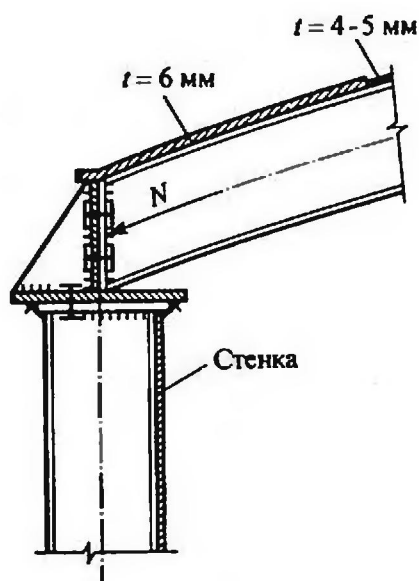


Рис. 6.2. Узел сопряжения стропил покрытия со стойками стенки

крепления верхнего ролика. Нижний конец стойки кронштейна с помощью уголка через гибкий фартук крепится на болтах к верхнему поясу опорного кольца. Остальные стержни кронштейна выполняются в виде парных прокатных уголков по типу стропильных ферм. Криволинейные стропила выполняют из прокатных швеллеров №14...18, по верху которых укладывают обшивку толщиной 4...5 мм. В центре поршня радиальные ребра присоединяют на болтах к центральному кольцу (барабану). Для увеличения веса шайба несет пригрузку бетонными блоками.

Вес конструкций поршня вместе с пригрузом создает необходимое давление газа в газгольдере. Газ под давлением,

подаваемый под поршень, поднимает его вверх до предельного высшего положения. Наоборот, при выпуске газа поршень своим весом с пригрузом вытесняет газ в трубопровод. Непосредственно под поршнем давление газа пропорционально весу поршня совместно с пригрузом и, пренебрегая по малости силами трения в уплотнении, может считаться постоянным.

Наиболее ответственная часть сухого газгольдера поршневого типа – затвор, надежная работа которого обеспечивает снижение потерь газа и безопасность работы обслуживающего персонала.

В сухих газгольдерах поршневого типа невозможно хранить газы высокой концентрации, так как они загрязняются в результате соприкосновения с газгольдерным маслом, находящимся в затворе. Их не рекомендуется применять в суровых климатических районах; рационально их применять, когда газ нельзя хранить в мокром газгольдере (этилен, пропилен и др.).

Газгольдер оснащается системой стабилизации поршня при его движении. Кронштейны по краю сферы также повышают устойчивость поршня в целом.

Исходным параметром при определении габаритных размеров сухого газгольдера поршневого типа является его номинальная емкость V . Диаметр газгольдера определяется по формулам

$$D = 1,05 \cdot \sqrt[3]{V}, \quad (6.1)$$

при $V = 10000 \dots 20000 \text{ м}^3$;

$$D = \sqrt[3]{V}, \quad (6.2)$$

при $V > 20000 \text{ м}^3$.

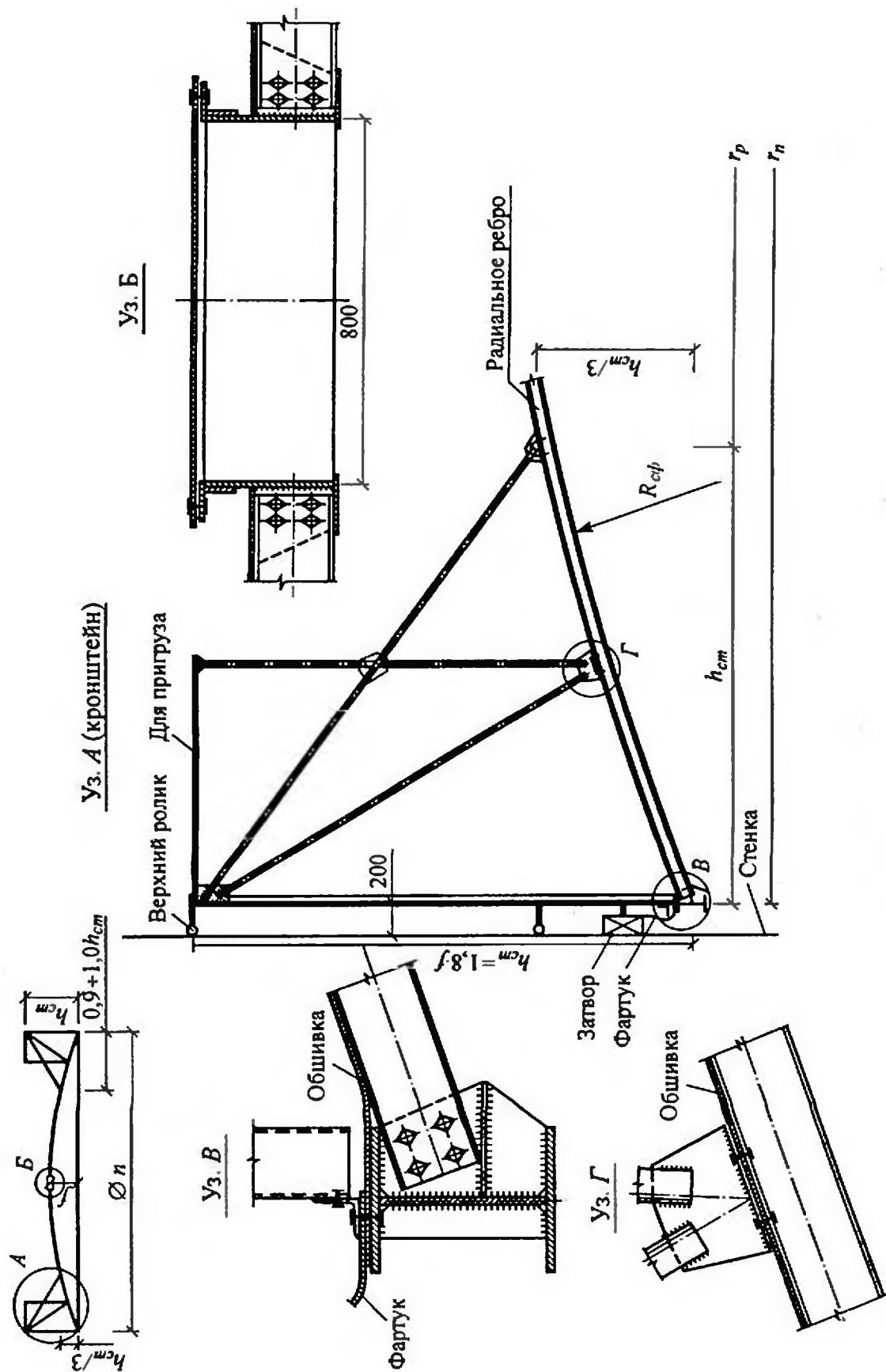


Рис. 6.3. Основные узлы каркаса поршня

Высота газгольдера H определяется по формуле

$$H = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} + H_n + h_1$$

и уточняется количеством царг. Здесь $H_n = h_{см}$ – высота поршня; $h_1 \approx 200$ мм. При ширине листа равной 1500 мм на строжку кромок следует отдать 10...15 мм.

Толщина стенки газгольдера определяется избыточным давлением газа $P_{изб}$ по формуле

$$t = \frac{P_{изб} \cdot r}{\gamma_c \cdot R_{wy}}, \quad (6.3)$$

где $\gamma_c = 0,9$;

r – радиус поперечного сечения газгольдера,

и проверяется по формуле (6.41).

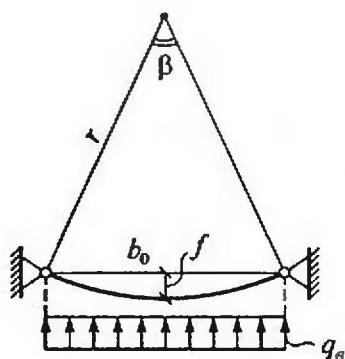


Рис. 6.4. Расчетная схема кольца жесткости стенки

Вертикальную нагрузку от собственного веса покрытия и снега на нем воспринимают стойки каркаса стенки, сечения которых назначаются конструктивно (по предельной гибкости).

Ветровая нагрузка передается оболочкой стенки на кольцевые ребра жесткости, которые следует проверять на устойчивость, как двухшарнирную арку на участке между двумя смежными стойками каркаса стенки (рис. 6.4).

Количество стоек каркаса стенки $n_{см}$ определяется с таким расчетом, чтобы расстояние между ними по дуге окружности было бы, примерно, равным 6,0 м. Центральный угол β между двумя смежными радиусами, оположение стоек в плане, разделяющими положение стоек в плане,

$$\beta = \frac{360^\circ}{n_{см}}. \quad (6.4)$$

Расстояние между двумя соседними стойками

$$b_0 = 2 \cdot r \cdot \sin \frac{\beta}{2}; \quad (6.5)$$

стрела подъема дуги арки

$$f = r \cdot \left(1 - \cos \frac{\beta}{2} \right). \quad (6.6)$$

Проверка арки на устойчивость производится по формуле [18]

$$(1,3 \dots 1,4) \cdot N_a \leq N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_x}{(\mu \cdot s_a)^2}, \quad (6.7)$$

где 1,3...1,4 – коэффициент безопасности на устойчивость;

$$N_a = q_s \cdot D/2,$$

q_s – погонная ветровая нагрузка на арку;

$$s_a = \sqrt{\left(\frac{b_0}{2}\right)^2 + \frac{4}{3}f^2} - \text{длина полуарки};$$

$\mu = 1,0$ при $f/b_0 = 0,05$; $\mu = 1,1$ при $f/b_0 = 0,2$;

J_x – момент инерции сечения кольца жесткости стенки (прокатный уголок) относительно вертикальной оси.

Покрытие рассчитывают аналогично покрытию колокола мокрого газгольдера от собственного веса покрытия вместе с оборудованием и снеговой нагрузки. Опорное кольцо жесткости покрытия рассчитывают на усилия распора от арок (швеллеров или двутавров, гнутых по радиусу окружности сферы).

Продольное усилие N_k и изгибающие моменты $M_{\max}$ и M_{cp} в кольце определяются по формулам (3.58), (3.56) и (3.57), где распор P определяется по формуле

$$P = q \cdot r, \quad (6.8)$$

$$n_{из} = n_{см},$$

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot (g_{пок} + S)}{n_{см}} = (g_{пок} + S) \cdot b_0,$$

$g_{пок}$ – расчетная нагрузка от собственного веса покрытия на 1 м^2 горизонтальной плоскости;

S – соответственно, расчетная снеговая нагрузка.

Сечение опорного кольца проверяется на внецентренное растяжение по формуле (без учета работы окрайки)

$$\sigma = \frac{N_k}{A_k} + \frac{M_{\max}}{W_{\min}} \leq \gamma_c \cdot R_y. \quad (6.9)$$

Включение в работу опорного кольца окрайки кровли уменьшит его сечение.

Радиальные ребра покрытия рассчитывают, как трехшарнирную арку. На вертикальную нагрузку ребристый купол расчленяется на отдельные плоские арки. Ребра купола в центре покрытия соединяются с помощью центрального кольца, к которому они присоединяются не жестко. Поэтому можно принять арки трехшарнирными, статически определимыми. Купол расчленяется на $n_p = n_{см}$ ребер, образующих $0,5 \cdot n_p$ арок, загруженных приближенно треугольной нагрузкой (рис. 5.8).

При $f/r \leq 1/6$ арку можно считать полой и нагрузку распределенной по пролету арки.

Составляющие опорной реакции арки:

– распор

$$P = \frac{qr^2}{6f}; \quad (6.10)$$

– балочная реакция

$$V = \frac{qr}{2}, \quad (6.11)$$

где $q = q_{с.в.} + q_{сн.}$

Изгибающий момент в любом сечении арки определяется по формуле

$$M_x = M_x^0 - P \cdot y, \quad (6.12)$$

продольное усилие

$$N_x = Q_x^0 \cdot \sin \alpha + P \cdot \cos \alpha, \quad (6.13)$$

где угол $\alpha = \arcsin \left(\frac{r-x}{r_{сф}} \right)$,

$$r_{сф} = \frac{r^2 + f^2}{2f}; \quad y = r_{сф} \cdot (\cos \alpha - \cos \alpha_0).$$

Наибольшее значение изгибающего момента при $x = 0,3 \cdot r$ и $f = (1/6) \cdot r$

$$M_{\max} = 0,023 \cdot q \cdot r^2, \quad (6.14)$$

продольное усилие в этом сечении

$$N = 0,473 \cdot q \cdot r. \quad (6.15)$$

Максимальное продольное усилие в опорном сечении арки

$$N_{\max} = 1,27 \cdot q \cdot r. \quad (6.16)$$

Радиальное ребро купола следует проверить в двух сечениях:

– в опорном на центральное сжатие;

– на расстоянии $0,3 \cdot r$ от опоры на внецентренное сжатие. При этом расчетная длина арки в своей плоскости

$$l_{ef} = 1,2 \cdot s, \quad (6.17)$$

где s – длина полуарки, определяемая по формуле

$$s = \sqrt{r^2 + \frac{4}{3} \cdot f^2}. \quad (6.18)$$

Элементы кольца ребристо-кольцевого купола воспринимают местную треугольную нагрузку, наибольшая величина которой определяется по формуле

$$q_1 = \frac{(g_{нок} + S) \cdot b_i \cdot (a_i + a_{i-1})}{4}, \quad (6.19)$$

где b_i – шаг колец;

a_i – расстояние между соседними ребрами для рассматриваемого элемента кольца,

и продольное усилие по формуле (3.64).

Изгибающий момент в элементе промежуточного кольца определяется по формуле

$$M_g = \frac{q_1 \cdot b_i}{6}, \quad (6.20)$$

как в балке на двух опорах (при неразрезных радиальных ребрах).

Основные размеры поршня (рис. 6.3):

- стрела подъема сферы покрытия поршня

$$f = \left(\frac{1}{11} \dots \frac{1}{12} \right) D;$$

- высота опорной стойки кронштейна

$$h_{cm} \approx 0,26 \cdot D;$$

- ширина кронштейна

$$(0,9 \dots 1,0) h_{cm}.$$

Количество криволинейных радиальных ребер назначается равным числу вертикальных стоек каркаса стенки.

Основными расчетными элементами каркаса поршня являются: криволинейные радиальные ребра, опорное кольцо и кронштейны. Толщина обшивки покрытия поршня назначается конструктивно 4...5 мм, так как она испытывает незначительное избыточное давление, и проверяется на прочность, как изгибно-жесткая нить (п. 2.4).

В рабочем состоянии (при наличии газа под поршнем) радиальные ребра через обшивку воспринимают избыточное давление газа, направленное вверх, и собственный вес конструкций покрытия поршня, направленный вниз. Для обеспечения заданной величины избыточного давления используют пригруз, который располагают на узкой кольцевой площадке почти над опорным кольцом. Пригруз, собственный вес опорного кольца и кронштейна не оказывают влияния на напряженное состояние радиального ребра.

В качестве расчетной схемы радиальных ребер поршня так же, как и для ребер покрытия газгольдера, применяется трехшарнирная круговая арка (рис. 6.5).

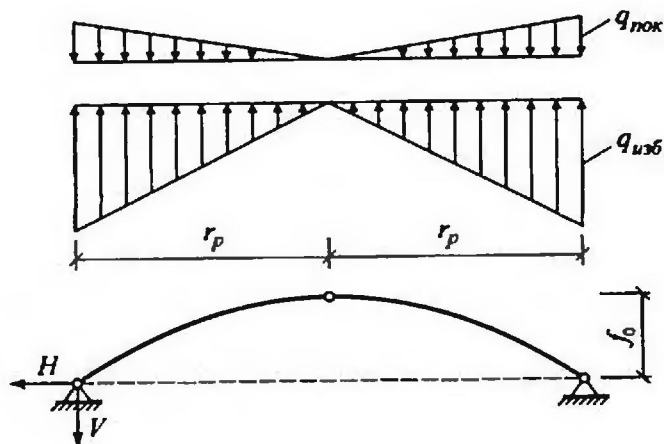


Рис. 6.5. Расчетная схема радиального ребра поршня

Нагрузка собственного веса покрытия поршня и избыточного давления на радиальные ребра будет по двум треугольникам. Причем, собственный вес покрытия поршня и поршня в целом предварительно принимают приближенно, а затем уточняют и определяют величину пригруза.

Расчетные усилия в сечениях арки определяются по формулам (6.14), (6.15) и (6.16) на действие результирующей нагрузки, если $f_0 = (1/6) \cdot r_p$.

$$q_p = q_{изб} - q_{пок}.$$

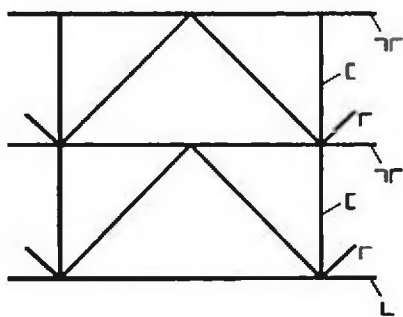


Рис. 6.6. Фрагмент схемы связевой фермы по стойкам кронштейна

В рабочем состоянии радиальные ребра будут воспринимать внецентренное растяжение. Опорное кольцо поршня при этом будет работать на внецентренное сжатие и устойчивость. При отсутствии газа в газгольдере поршень будет находиться в нижнем положении и воспринимать только нагрузку от собственного веса покрытия.

По периметру поршня стойки кронштейнов следует объединить связевой фермой (рис. 6.6), сечения стержней которой назначают по предельной гибкости.

Радиус в горизонтальном сечении поршня $r_n = r - 200$ мм; расчетный пролет арки (рис. 6.5) $2 \cdot r_p$, где $r_p = r_n - 1,8 \cdot f$; $f \approx (1/11) \cdot D$, D – диаметр газгольдера.

Стрелка подъема арки радиального ребра

$$f_0 = \frac{r_n^2 + f^2}{2 \cdot f} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot f^2 \cdot r_p^2}{(r_n^2 + f^2)^2}} \right). \quad (6.21)$$

Длина арки (двух ребер)

$$l_p = 2 \cdot \sqrt{r_p^2 + \frac{4}{3} \cdot f_0^2}. \quad (6.22)$$

Расстояние между концами радиальных ребер по дуге окружности

$$b_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_p}{n_p}, \quad (6.23)$$

где $n_p = n_{ст}$ – число стоек стенки газгольдера.

Предварительно надо задаться сечением радиального ребра, например, 2 [18, и определить собственный вес ребра g_p длиной l_p . Собственный вес радиальных ребер, приходящийся на 1 м² горизонтальной плоскости

$$g_{p1} = \frac{g_p \cdot n_p}{2 \cdot \pi \cdot r_p^2}. \quad (6.24)$$

Собственный вес обшивки толщиной $t_{об}$ тоже на 1 м^2

$$g_{об} = t_{об} \cdot \rho_{ст} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}, \quad (6.25)$$

где $\rho_{ст} = 7850 \text{ кг/м}^3$ – плотность стали.

Интенсивность нагрузки от собственного веса покрытия поршня у концов радиального ребра

$$q_{нок} = (g_{p_1} + g_{об}) \cdot b_p. \quad (6.26)$$

Соответствующая величина от избыточного давления газа

$$q_{изб} = \gamma_{f_2} \cdot P''_{изб} \cdot b_p, \quad (6.27)$$

где $\gamma_{f_2} = 1,2$.

Результирующая интенсивность нагрузки у концов радиального ребра

$$q_p = q_{изб} - \gamma_{f_0} \cdot K \cdot q_{нок}, \quad (6.28)$$

где $\gamma_{f_0} = 0,9$ – коэффициент надежности для постоянной нагрузки;

$K = 1,3 \dots 1,4$ – коэффициент, учитывающий собственный вес промежуточных колец жесткости, связей и деталей крепления элементов покрытия.

Вертикальная V и горизонтальная H (распор) составляющие опорной реакции арки определяются соответственно по формулам

$$V = \frac{q_p \cdot r_p}{2}; \quad H = \frac{q_p \cdot r_p^2}{6 \cdot f_0}. \quad (6.29)$$

Рассматриваемая арка является полой, у которой продольное усилие вдоль ее оси меняется слабо. Поэтому расчетным сечением арки будет сечение с максимальным изгибающим моментом от рассматриваемой нагрузки. Положение такого сечения определяется углом α (угол между касательной к оси арки и горизонтальной осью).

$$\alpha = \arctg \beta, \quad (6.30)$$

где $\beta = B - \sqrt{B^2 - 1}$,

$$B = \frac{3}{8} \cdot \frac{(r_p^2 + f_0^2)^2}{f_0 \cdot r_p^3}.$$

Изгибающий момент в сечении арки определяется по формуле

$$M_x = M_x^0 - H \cdot y, \quad (6.31)$$

где M_x^0 – балочный изгибающий момент в сечении на расстоянии

$$x = r_p - \frac{(r_p^2 + f_0^2)}{2 \cdot f_0} \cdot \sin \alpha \text{ от левой опоры;}$$

$$y = \frac{r_p^2 + f_0^2}{2 \cdot f_0} (\cos \alpha - 1) + f_0.$$

Угол α , определяемый по формуле (6.30), соответствует максимально-му изгибающему моменту. Продольное усилие в этом сечении арки будет определяться по формуле

$$N = \frac{q_p \cdot r_p}{2} \left\{ 0,25 \cdot \left[1 + \left(\frac{f_0}{r_p} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{r_p}{f_0} \right)^2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{r_p}{f_0} \right) \cdot \cos \alpha \right\} \quad (6.32)$$

или по формуле

$$N = H \cdot \cos \alpha + Q^b \cdot \sin \alpha.$$

Сечение радиального ребра проверяется по формуле

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_{\max}}{W_{x,\min}} \leq \gamma_c \cdot R_y, \quad (6.33)$$

где в сечение ребра включаются две полосы обшивки шириной по $0,65 \cdot t_{об} \cdot \sqrt{E/R_y}$ и полоса обшивки над ребром.

Опорное кольцо поршня радиусом r_n (рис. 6.3, Уз. В) работает на вне-центрированное сжатие от распоров радиальных ребер поршня H_k

$$H_k = \frac{q_k \cdot r_n^2}{6 \cdot f},$$

где $q_k = q_{изб}^0 - \gamma_{f_0} \cdot K \cdot q_{пок}^0$,

$$q_{изб}^0 = \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}^H \cdot b_0;$$

$$\gamma_{f_0} = 0,9; K = 1,4 \dots 1,6;$$

$$q_{пок}^0 = (g_{p_1} + g_{об}) \cdot b_0.$$

Максимальный момент (под радиальным ребром) M_y в плоскости кольца определяется по формуле (3.56); продольное усилие по формуле (3.58).

Сечением опорного кольца поршня предварительно следует задаться и определить его геометрические характеристики. Для двутаврового сечения требуемый момент сопротивления можно определить по приближенной формуле:

$$W_{mp} \approx \frac{1,4 \cdot M_y}{\gamma_c \cdot R_y}.$$

Прочность опорного кольца проверяется по формуле

$$\sigma = \frac{N}{A_k} + \frac{M_y}{W_y} \leq \gamma_c \cdot R_y. \quad (6.34)$$

Величина пригруза G_{npz} определяется из условия равенства суммарного избыточного давления на поршень собственному весу поршня и пригруза, т.е.

$$G_{npz} + G_n = G_{изб}, \quad (6.35)$$

где $G_{изб} = \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}^H \cdot \pi \cdot r_n^2$;

G_n – собственный вес поршня, определяемый по формуле

$$G_n = g_{нок} \cdot \gamma_{f_0} \cdot K \cdot \pi \cdot r_n^2 + g_{онк} \cdot K_{кр} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_n, \quad (6.36)$$

где $g_{нок} = g_p + g_{об}$; $K = 1,3 \dots 1,5$;

$g_{онк}$ – вес 1 погонного метра опорного кольца поршня;

$K_{кр}$ – коэффициент, учитывающий собственный вес деталей кронштейна со связями, площадки для пригруза, роликов и затвора;

$K_{кр} \approx 2,0 \dots 3,0$.

Пригруз размещается на кольцевой площадке кронштейна и передается в виде двух сосредоточенных сил F_{npz} на узлы кронштейна (рис. 6.7).

Сосредоточенная сила пригруза определяется по формуле

$$F_{npz} = \frac{G_{npz} \cdot b_0}{4 \cdot \pi \cdot (r_n - a_n/2)}. \quad (6.37)$$

Кронштейн представляет собой плоскую стержневую конструкцию в виде консольной фермы (рис. 6.7), на которую передается опорная реакция от арки радиального ребра. Усилия в стрержнях кронштейна определяются методом вырезания узлов, начиная с узла 3.

Толщина обшивки поршня назначается (4...5 мм) и проверяется на прочность по формуле (2.36).

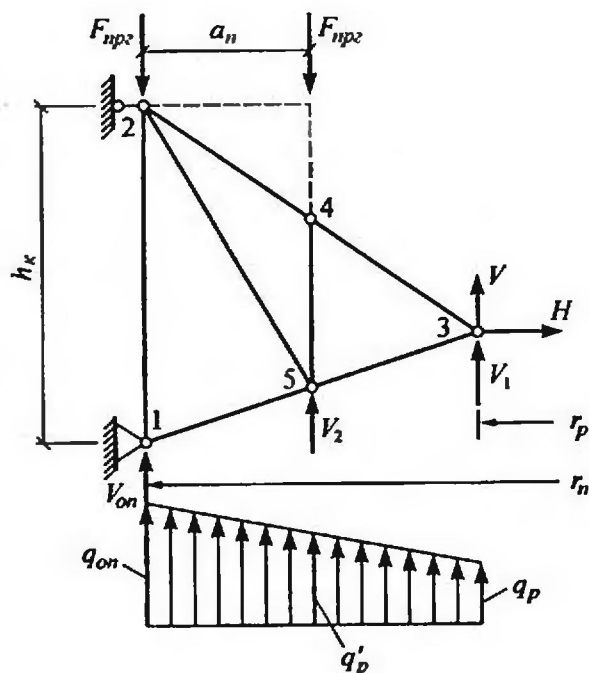


Рис. 6.7. Расчетная схема кронштейна

6.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ СУХОГО ГАЗГОЛЬДЕРА ПОРШНЕВОГО ТИПА

Требуется рассчитать основные элементы сухого газгольдера поршневого типа номинальной емкости $V = 30000 \text{ м}^3$ для хранения газа под избыточным давлением $P_{изб}^H = 4 \text{ кПа}$ при эксплуатации его в I-м ветровом и III-м снеговом районах.

6.2.1. Определение габаритных размеров газгольдера

Диаметр газгольдера определяется по формуле (6.2)

$$D = \sqrt[3]{V} = \sqrt[3]{30000} = 31,0 \text{ м.}$$

Уточним диаметр газгольдера с учетом использования стальных листов размером $1500 \times 6000 \text{ мм}$. Фактическая длина листа с учетом строжки кромок

$$b_{\lambda} = 6000 - 10 = 5990 \text{ мм.}$$

Количество листов в одном кольце стенки газгольдера

$$n_{\lambda} = \frac{\pi \cdot D}{b_{\lambda}} = \frac{3,1416 \cdot 31,0}{5,99} = 16,26 \text{ шт.}$$

Примем $n_{\lambda} = 16$ шт. Тогда фактический диаметр газгольдера станет равным

$$D = \frac{n_{\lambda} \cdot b_{\lambda}}{\pi} = \frac{16 \cdot 5,99}{3,1416} = 30,507 \text{ м.}$$

Высота поршня

$$H_n = h_{cm} = 0,26 \cdot D = 0,26 \cdot 30,507 = 7,932 \text{ м.}$$

Высота стенки газгольдера при $h_1 = 0,2$ м

$$H = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} + H_n + h_1 = \frac{4 \cdot 30000}{3,1416 \cdot 30,507^2} + 7,932 + 0,2 = 49,174 \text{ м.}$$

Количество колец по высоте стенки

$$n_k = \frac{H}{b_{\lambda}} = \frac{49,174}{1,490} = 33 \text{ шт.}$$

Ход поршня

$$X_n = H - H_n - h_1 = 49,174 - 7,932 - 0,2 = 41,042 \text{ м.}$$

Фактическая емкость газгольдера

$$V_{\phi} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot X_n = \frac{3,1416 \cdot 30,507^2}{4} \cdot 41,042 = 30000 \text{ м}^3,$$

равна номинальной. Но может отличаться от номинальной на 2...3%.

6.2.2. Определение толщины стенки газгольдера из условия прочности стыковых швов

Для стенки примем листовую сталь с расчетным сопротивлением по пределу текучести $R_y = 24,0 \text{ кН/см}^2$. Учитывая обычные способы контроля сварных швов, имеем

$$R_{wy} = 0,85 \cdot R_y = 0,85 \cdot 24,0 = 20,4 \text{ кН/см}^2.$$

Требуемая по прочности толщина стенки по формуле (6.3)

$$t = \frac{\gamma_f \cdot P_{изб}'' \cdot D}{2 \cdot \gamma_c \cdot R_{wy}} = \frac{1,2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-4} \cdot 30,507 \cdot 10^2}{2 \cdot 0,9 \cdot 20,4} = 0,04 \text{ см} < 1 \text{ мм.}$$

Формула (6.3) не учитывает влияние горизонтальных колец жесткости на напряженное состояние обшивки стенки. В целом стенка газгольдера укрепляется каркасом из вертикальных двутавровых стоек и горизонтальных колец жесткости с шагом $a = 1,5$ м. Поэтому обшивку стенки газгольдера следует проверять на прочность по формуле (2.36), предварительно задав-

шись ее толщиной.

Примем толщину обшивки стенки $t_{об} = 4 \text{ мм}$. Распор полосы обшивки единичной ширины и пролетом $a = 1,5 \text{ м}$ определяем по формуле (2.34)

$$H = \sqrt[3]{\frac{P_{изб}^2 \cdot a^2 \cdot E_1 \cdot t_{об}}{24}} = \sqrt[3]{\frac{(1,2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 150^2 \cdot 2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,4}{24}} = 1,4 \text{ кН/см},$$

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

Опорный изгибающий момент полосы по формуле (2.35)

$$M_{он} \approx \frac{P_{изб} \cdot a}{2K},$$

где $K = \sqrt{\frac{12 \cdot H}{E_1 \cdot t_{об}^3}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 1,4}{2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,4^3}} = 0,11 \frac{1}{\text{см}};$

$$M_{он} \approx \frac{1,2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-4} \cdot 150}{2 \cdot 0,11} = 0,33 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

$$\sigma = \frac{H}{t_{об}} + \frac{6 \cdot M_{он}}{t_{об}^2} = \frac{1,4}{0,4} + \frac{6 \cdot 0,33}{0,4^2} = 15,9 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_{wy} = 20,4 \text{ кН/см}^2 -$$

прочность обшивки стенки обеспечена.

6.2.3. Расчет горизонтальных колец жесткости на ветровую нагрузку (рис. 6.4)

Примем шаг горизонтальных колец по высоте стенки равным ширине листа $b_{л} = 1500 \text{ мм}$.

Интенсивность ветровой нагрузки на кольцо определяется по формуле

$$q_v = \gamma_f \cdot w_0 \cdot \kappa_0 \cdot c_{e1} \cdot b_{л},$$

где $\gamma_f = 1,4$; $w_0 = 0,23 \text{ кПа}$ (для I ветрового района);

$\kappa_0 = 1,18$ при $z = 48 \text{ м}$ – для местности типа В [26];

$c_{e1} = 1,0$ (рис. 2.12);

$$q_v = 1,4 \cdot 0,23 \cdot 1,18 \cdot 1,0 \cdot 1,5 = 0,57 \text{ кН/м}.$$

Определяем количество стоек каркаса стенки $n_{см}$

$$n_{см} = \frac{\pi \cdot D}{6,0} = \frac{3,1416 \cdot 30,507}{6,0} = 15,97.$$

Примем $n_{см} = 16$ шт. Тогда центральный угол β между смежными стойками газгольдера равен

$$\beta = \frac{360^\circ}{n_{см}} = \frac{360^\circ}{16} = 22,5^\circ.$$

Расстояние между двумя соседними стойками b_0 , которое принимается за пролет арки, определяется по формуле (6.5)

$$b_0 = 2 \cdot r \cdot \sin \frac{\beta}{2} = 2 \cdot \frac{30,507}{2} \cdot \sin \frac{22,5^\circ}{2} = 5,95 \text{ м.}$$

Стрела подъема арки по формуле (6.6)

$$f = \frac{D}{2} \cdot \left(1 - \cos \frac{\beta}{2} \right) = \frac{30,507}{2} \cdot \left(1 - \cos \frac{22,5^\circ}{2} \right) = 0,293 \text{ м.}$$

Проверка двухшарнирной арки на устойчивость производится по формуле (6.7), где

$$N_a = q_e \cdot D/2 = 0,57 \cdot 30,507/2 = 8,7 \text{ кН;}$$

$$s = \sqrt{\left(\frac{b_0}{2} \right)^2 + \frac{4}{3} \cdot f^2} = \sqrt{\left(\frac{5,95}{2} \right)^2 + \frac{4}{3} \cdot 0,293^2} = 3,0 \text{ м;}$$

при $f/b_0 = 0,293/5,95 = 0,049 \quad \mu = 1,0$.

Примем для кольца жесткости стенки прокатный $\angle 75 \times 75 \times 6$ ($J_x = 46,6 \text{ см}^4$; $A_{yz} = 8,78 \text{ см}^2$; $i_x = 2,3 \text{ см}$) по ГОСТ 8509-86.

Критическое продольное усилие

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_x}{(\mu \cdot s)^2} = \frac{3,14^2 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 46,6}{(1,0 \cdot 300)^2} = 105 \text{ кН} > N_a = 8,7 \text{ кН.}$$

Устойчивость арки обеспечена.

Проверим сечение арки по предельной гибкости

$$\lambda = \frac{\mu \cdot s}{i_x} = \frac{1,0 \cdot 300}{2,3} = 130 < [\lambda] = 180.$$

Проверка арки на избыточное давление

$$N_{изб} = P_{изб} \cdot a \cdot r = 1,2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-4} \cdot 150 \cdot 15,2 \cdot 10^2 = 104,4 \text{ кН.}$$

$$\sigma = \frac{N_{изб}}{A_{yz}} = \frac{104,4}{8,78} = 11,9 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

6.2.4. Расчет основных элементов ребристого покрытия газгольдера (опорное кольцо, радиальные ребра, элементы промежуточных колец покрытия и кровля)

Нагрузка на опорное кольцо: распоры P , передаваемые радиальными ребрами на опорное кольцо, определяемые по формуле (6.10).

Интенсивность вертикальной нагрузки q на радиальное ребро покрытия у опорного кольца

$$q = q_{пок} + S,$$

где $q_{пок}$ – нагрузка от собственного веса покрытия:

$$q_{пок} = \bar{g}_{пок} \cdot b_0,$$

$\bar{g}_{пок}$ – нагрузка на 1 м² горизонтальной плоскости от собственного веса покрытия. Примем вес покрытия сухого газгольдера таким же, как для покрытия колокола мокрого газгольдера (см. п. 5.4.2), т.е. $G_{пок} \approx 200$ кН.

Тогда

$$\bar{g}_{пок} = \frac{4 \cdot G_{пок}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 200}{3,14 \cdot 30,507^2} = 0,27 \text{ кН/м}^2.$$

Снеговая нагрузка на 1 м² полого купола

$$S = S_g \cdot \mu = 1,8 \cdot 1,0 = 1,8 \text{ кН/м}^2.$$

Суммарная интенсивность нагрузки

$$q = (\bar{g}_{пок} + S) \cdot b_0 = (0,27 + 1,8) \cdot 5,95 = 12,3 \text{ кН/м}.$$

Распор по формуле (6.8)

$$P = q \cdot D / 2 = 12,3 \cdot 30,507 / 2 = 188 \text{ кН}.$$

Максимальный момент

$$M_{\max} = -\frac{P \cdot D}{4} \cdot \left(\frac{n_{cm}}{\pi} - \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n_{cm}} \right) = -\frac{188,0 \cdot 30,507}{4} \cdot \left(\frac{16}{3,1416} - \operatorname{ctg} \frac{180^\circ}{16} \right) = -93,9 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Продольное усилие в опорном кольце

$$N_{\kappa} = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n_{cm}}} = \frac{188,0}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{16}} = 482 \text{ кН}.$$

Сечение опорного кольца покрытия примем в виде симметричного двутавра с горизонтальным расположением стенки (рис. 3.26) для восприятия распоров от радиальных ребер.

Опорное кольцо покрытия работает на внецентренное растяжение. Требуемый момент сопротивления сечения относительно вертикальной оси приближенно можно определить по формуле

$$W_{mp} \approx 1,4 \cdot \frac{M_{\max}}{\gamma_c \cdot R_y} = 1,4 \cdot \frac{93,9 \cdot 10^2}{1,0 \cdot 24,0} = 548 \text{ см}^3.$$

Полученная величина W_{mp} соответствует прокатному двутавру $\text{I} 23\text{K1}$ ($W_x = 580 \text{ см}^3$; $A = 66,51 \text{ см}^2$) по ГОСТ 26020-83.

Проверка сечения опорного кольца на прочность

$$\sigma = \frac{N_{\kappa}}{A} + \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{482,0}{66,51} + \frac{93,9 \cdot 10^2}{580,0} = 23,4 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_y = 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Узел опирания кольца на стойки газгольдера показан на рис. 6.8.

альные ребра. При этом радиальные ребра воспринимают внецентренное сжатие и проверяются по формуле

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_e \cdot A} \leq \gamma_c \cdot R_y.$$

Подбор сечения ребра производится методом попыток.

Для определения коэффициента φ_e вычислим относительный эксцентриситет m и условную гибкость $\bar{\lambda}$. Примем сечение радиального ребра из двух прокатных швеллеров №24 ($A_{ув} = 30,6 \text{ см}^2$; $i_x = 9,73 \text{ см}$; $W_x = 242 \text{ см}^3$) по ГОСТ 8240-89.

$$m = \frac{M \cdot A_{ув}}{N \cdot W_x} = \frac{65,8 \cdot 10^2 \cdot 30,6}{88,7 \cdot 242,0} = 9,38;$$

$$\bar{\lambda} = \frac{l_{ef}}{i_x} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{1862,0}{9,73} \cdot \sqrt{\frac{24,0}{2,06 \cdot 10^4}} = 6,53.$$

Отношение площадей сечения полки и стенки швеллера №24

$$\frac{A_f}{A_w} = \frac{9,0 \cdot 1,0}{(24,0 - 2,0 \cdot 1,0) \cdot 0,56} = 0,73.$$

По табл. 73 [28] при $m = 9,38 < 20,0$; $\bar{\lambda} = 6,53 > 5,0$ и $A_f/A_w = 0,73 \Rightarrow \eta = 1,27$.

Приведенный относительный эксцентриситет

$$m_{ef} = \eta \cdot m = 1,27 \cdot 9,37 = 11,9.$$

По табл. 74 [28] при $m_{ef} = 11,9$ и $\bar{\lambda} = 6,53 \Rightarrow \varphi_e = 0,068$.

Проверка сечения радиального ребра

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_e \cdot 2 \cdot A_{ув}} = \frac{88,7}{0,068 \cdot 2 \cdot 30,6} = 21,3 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Оставим принятое сечение радиального ребра покрытия из двух швеллеров №24 окончательным.

Элемент первого промежуточного кольца от опоры рассматривается как балка пролетом $b_1 = 4,808 \text{ м}$ (при шаге промежуточных колец равном $a = 3 \text{ м}$) с равномерно распределенной нагрузкой

$$q_1 = (\bar{g}_{нок} + S) \cdot a = (0,27 + 1,8) \cdot 3,0 = 6,21 \text{ кН/м}.$$

Максимальный момент в кольце

$$M_1 = \frac{q_1 \cdot b_1^2}{8} = \frac{6,21 \cdot 4,808^2}{8} = 17,94 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Требуемый момент сопротивления сечения кольца

$$W_{mp} = \frac{M_1}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{17,94 \cdot 10^2}{1,0 \cdot 24,0} = 74,75 \text{ см}^3.$$

Примем $\square 16$ ($W_x = 93,4 \text{ см}^3 > W_{\text{нр}}$) по ГОСТ 8240-89.

Примем толщину листов кровли покрытия равной 5 мм и проверим их на прочность по формуле (2.32). Нагрузками на кровлю являются собственный вес кровли q_0 и снеговая. Суммарная нагрузка на расчетную полосу кровли

$$q = q_0 + q_{\text{сн}} = 1,05 \cdot 0,01 \cdot 0,01 \cdot 0,005 \cdot 7850 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} + 1,8 \cdot 1,0 \cdot 10^{-4} = \\ = 2,204 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см.}$$

Распор

$$H = \frac{q \cdot a^2}{8 \cdot f} - \frac{48 \cdot E_1 \cdot J}{a^2},$$

где $a = 3000 \text{ мм}$; $f = \frac{1}{100} a = \frac{1}{100} \cdot 3000 = 30 \text{ мм}$;

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

$$J = \frac{1 \cdot t_{\text{кр}}^3}{12}; \quad t_{\text{кр}} = 5 \text{ мм}$$

$$H = \frac{2,204 \cdot 10^{-4} \cdot 300,0^2}{8 \cdot 3,0} - \frac{48 \cdot 2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,5^3}{12 \cdot 300,0^2} = 0,7 \text{ кН.}$$

Коэффициент

$$K = \sqrt{\frac{H}{E_1 \cdot J}} = \sqrt{\frac{0,7 \cdot 12}{2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,5^3}} = 0,055 \frac{1}{\text{см}}.$$

Опорный момент полосы по формуле (2.31)

$$M_{\text{оп}} = \frac{q \cdot a}{2 \cdot K} = \frac{2,204 \cdot 10^{-4} \cdot 300,0}{2 \cdot 0,055} = 0,6 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

Проверка листов кровли на прочность

$$\sigma = \frac{H}{t_{\text{кр}}} + \frac{6 \cdot M_{\text{оп}}}{t_{\text{кр}}^2} = \frac{0,7}{0,5} + \frac{6 \cdot 0,6}{0,5^2} = 15,8 \text{ кН/см}^2 < \gamma_c \cdot R_y = 24 \text{ кН/см}^2.$$

6.2.5. Расчет основных элементов поршня (каркаса днища, обшивки днища)

Основными расчетными элементами каркаса днища поршня являются (рис. 6.9):

- криволинейные радиальные ребра;
- опорное кольцо, воспринимающее распоры радиальных ребер;
- промежуточные горизонтальные кольца;
- кронштейны радиальных ребер.

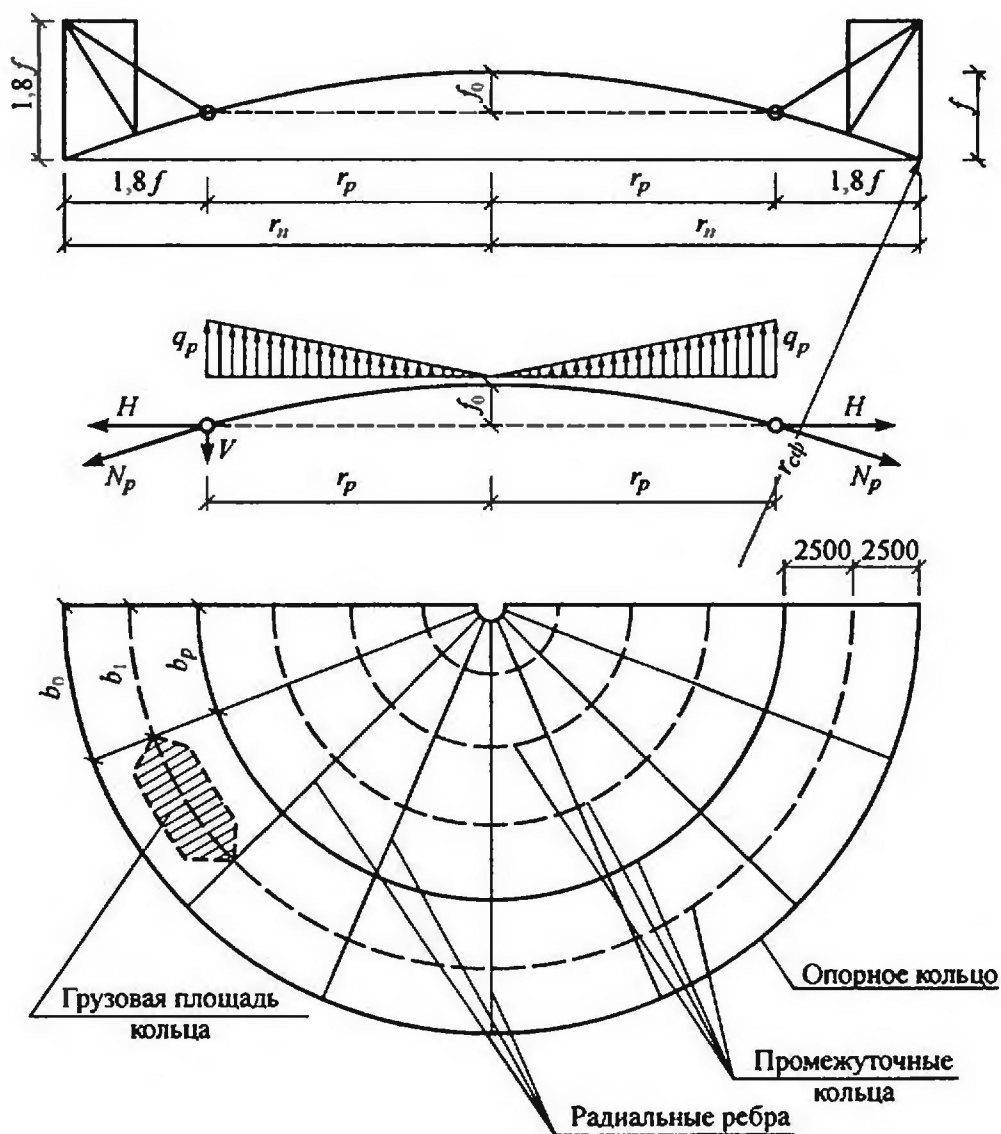


Рис. 6.9. Схема каркаса поршня

Количество радиальных ребер принимается равным числу вертикальных стоек каркаса стенки газгольдера, т.е. 16 шт. Днище поршня принимается вогнутым с целью повышения устойчивости поршня при его движении. Стрела подъема сферы поршня (рис. 6.3)

$$f \approx \frac{1}{11} \cdot D = \frac{1}{11} \cdot 30,5 = 2,8 \text{ м.}$$

Примем шаг промежуточных колец каркаса днища $a = 2500 \text{ мм}$; толщину обшивки днища $t_{об} = 5 \text{ мм}$. Проверим обшивку на прочность при $R_y = 24,0 \text{ кН/см}^2$ и $\gamma_c = 1,0$.

Собственный вес 1 м^2 обшивки

$$q_{с.в.} = t_{об} \cdot \rho_{ст} \cdot g \cdot 10^{-3} = 0,005 \cdot 7850 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 0,385 \text{ кН/м}^2.$$

При вычислении собственного веса обшивки не учтен коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,05$, поскольку собственный вес обшивки противоположно направлен по отношению к избыточному давлению газа и тем самым улучшает работу обшивки на прочность.

Избыточное давление газа

$$q_{изб} = \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}'' = 1,2 \cdot 4,0 = 4,8 \text{ кН/м}^2.$$

Результирующее давление на 1 см^2 обшивки составит

$$q = q_{изб} - q_{с.в.} = (4,8 - 0,385) \cdot 10^{-4} = 4,42 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2.$$

Рассматривая полосу единичной ширины обшивки, величина $q = 4,42 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}$ – является погонной нагрузкой полосы.

Момент инерции рассматриваемой полосы

$$J_1 = \frac{1 \cdot t_{об}^3}{12} = \frac{0,5^3}{12} = 0,0104 \text{ см}^3.$$

При $f_{дн} = \frac{1}{100} \cdot a = \frac{1}{100} \cdot 2500 = 25 \text{ мм}$ и $E_1 = 2,26 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$

распор

$$H = \frac{q \cdot a^2}{8 \cdot f_{дн}} - \frac{48 \cdot E_1 \cdot J_1}{a^2} = \frac{4,42 \cdot 10^{-4} \cdot 250,0^2}{8 \cdot 2,5} - \frac{48 \cdot 2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,0104}{250,0^2} = 1,2 \text{ кН/см}.$$

Коэффициент податливости

$$K = \sqrt{\frac{H}{E_1 \cdot J_1}} = \sqrt{\frac{1,2}{2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,0104}} = 0,071 \frac{1}{\text{см}}.$$

Величина опорного момента полосы по формуле (2.31)

$$M_{он} = \frac{q \cdot a}{2 \cdot K} = \frac{4,42 \cdot 10^{-4} \cdot 250,0}{2 \cdot 0,071} = 0,778 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

Проверка полосы обшивки на прочность

$$\sigma = \frac{H}{t_{об}} + \frac{6 \cdot M_{он}}{t_{об}^2} = \frac{1,2}{0,5} + \frac{6 \cdot 0,778}{0,5^2} = 21,02 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность обшивки достаточна. Если бы оказалось, что $\sigma < \gamma_c \cdot R_y$, т.е. прочность обшивки недостаточна, то следовало бы уменьшить шаг промежуточных колец.

Переходим к расчету радиального ребра поршня. Расчетная схема радиального ребра поршня приведена на рис. 6.5. Очертание оси арки – по дуге окружности.

Вычислим геометрические параметры арки.

Половина пролета арки

$$r_p = r_n - 1,8 \cdot f = 15,05 - 1,8 \cdot 2,8 = 10,0 \text{ м};$$

стрела подъема арки

$$f_0 = \frac{r_n^2 + f^2}{2 \cdot f} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot f^2 \cdot r_p^2}{(r_n^2 + f^2)^2}} \right) =$$
$$= \frac{15,05^2 + 2,8^2}{2 \cdot 2,8} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 2,8^2 \cdot 10,0^2}{(15,05^2 + 2,8^2)^2}} \right) = 1,212 \text{ м.}$$

Расстояние между соседними радиальными ребрами по границе кронштейна

$$b_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_p}{n_p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10,0}{16} = 3,93 \text{ м;}$$

по краю поршня

$$b_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_n}{n_p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 15,05}{16} = 5,91 \text{ м.}$$

Предварительно зададим сечение радиального ребра из двух прокатных швеллеров №18 ($g_{шв} = 16,3 \text{ кг/м}$; $A_{шв} = 20,7 \text{ см}^2$; $J_x = 1090 \text{ см}^4$).

Нагрузками на радиальное ребро являются: собственные веса ребра и промежуточных колец, избыточное давление газа. Собственный вес двух ребер длиной $2 \cdot r_p$

$$g_p = 2 \cdot g_{шв} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot r_p = 2 \cdot 16,3 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10,0 = 6,4 \text{ кН.}$$

Ввиду пологости арки не делаем различие между длиной арки и ее пролетом. На 1 м^2 горизонтальной плоскости приходится вес радиального ребра

$$g_{p1} = \frac{g_p \cdot n_p}{2 \cdot \pi \cdot r_p^2} = \frac{6,4 \cdot 16}{2 \cdot 3,14 \cdot 10,0^2} = 0,163 \text{ кН/м}^2.$$

С учетом собственного веса кольцевого ребра

$$g_{p1} = 1,4 \cdot 0,163 = 0,228 \text{ кН/м}^2,$$

где 1,4 – коэффициент, учитывающий приближенно увеличение собственного веса ребра за счет кольцевых ребер.

Собственный вес 1 м^2 обшивки при $t_{об} = 5 \text{ мм}$

$$q_{с.в.} = 0,385 \text{ кН/м}^2 \text{ (см. расчет обшивки днища).}$$

Результирующая интенсивность нагрузки у опоры арки

$$q_p = q_{изб} - q_{пок} \cdot \gamma_{f_0},$$

где $q_{изб} = P_{изб} \cdot b_p = 4,8 \cdot 3,93 = 18,9 \text{ кН/м}$;

$$q_{пок} = (g_{p1} + q_{с.в.}) \cdot b_p = (0,228 + 0,385) \cdot 3,93 = 2,4 \text{ кН/м};$$

$\gamma_{f_0} = 0,9$ – коэффициент надежности для нагрузки от собственного веса покрытия

$$q_p = 18,9 - 2,4 \cdot 0,9 = 16,74 \text{ кН/м.}$$

Расчетные усилия в сечении арки определять по формулам (6.14) и (6.15) нельзя, так как в нашем случае $f_0 = 1,212 \text{ м} < 1/6 \cdot r_p$.

Для трехшарнирной арки при нагрузке по двум треугольникам наибольшее значение изгибающего момента находится в сечении с координатами

$$x = r_p - r_{c\phi} \cdot \sin \alpha \quad \text{и} \quad y = r_{c\phi} (\cos \alpha - 1) + f_0,$$

где $r_{c\phi} = \frac{r_p^2 + f_0^2}{2 \cdot f_0}$; $\alpha = \arctg \beta$,

$$\beta = \frac{3}{2} \cdot \frac{r_{c\phi}^2 \cdot f_0}{r_p^3} - \sqrt{\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{r_{c\phi}^2 \cdot f_0}{r_p^3} \right)^2 - 1}.$$

При $r_p = 10,0 \text{ м}$ и $f_0 = 1,212 \text{ м}$ получим

$$r_{c\phi} = \frac{10,0^2 + 1,212^2}{2 \cdot 1,212} = 41,86 \text{ м;}$$

$$\beta = \frac{3}{2} \cdot \frac{41,86^2 \cdot 1,212}{10,0^3} - \sqrt{\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{41,86^2 \cdot 1,212}{10,0^3} \right)^2 - 1} = 0,161;$$

$$\alpha = \arctg 0,161 = 9,15^\circ;$$

$$x = 10,0 - 41,86 \cdot \sin 9,15^\circ = 3,343 \text{ м;}$$

$$y = 41,86 \cdot (\cos 9,15^\circ - 1) + 1,212 = 0,68 \text{ м.}$$

Составляющие опорной реакции арки:

– распор

$$H = \frac{q_p \cdot r_p^2}{6 \cdot f_0} = \frac{16,74 \cdot 10,0^2}{6 \cdot 1,212} = 230 \text{ кН;}$$

– балочная реакция

$$V = \frac{q_p \cdot r_p}{2} = \frac{16,74 \cdot 10,0}{2} = 84 \text{ кН.}$$

Вычислим балочный момент в сечении $x = 3,343 \text{ м}$ (рис. 6.10).

$$\begin{aligned} M_x^0 &= 84,0 \cdot 3,343 - \frac{1}{2} \cdot 16,74 \cdot 3,343 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3,343 - \frac{1}{2} \cdot 11,14 \cdot 3,343 \cdot \frac{1}{3} \cdot 3,343 = \\ &= 198 \text{ кН} \cdot \text{м.} \end{aligned}$$

Наибольшее значение изгибающего момента в сечении арки

$$M_{\max} = M_x^0 - H \cdot y = 198,0 - 230,0 \cdot 0,68 = 41,6 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

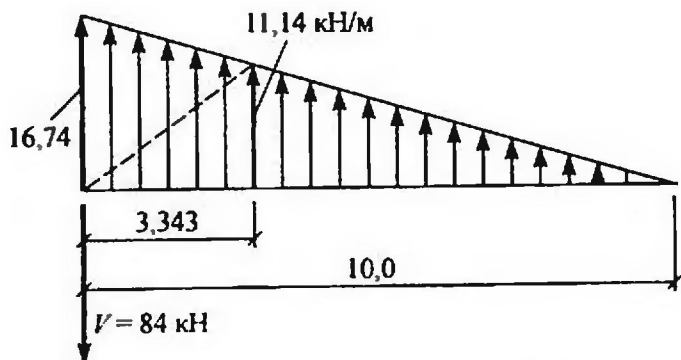


Рис. 6.10. К определению M_x^b

Балочная поперечная сила в сечении $x = 3,343$ м

$$Q^b = 84,0 - \frac{16,74 + 11,14}{2} \cdot 3,343 = 37,4 \text{ кН.}$$

Продольное усилие в сечении арки при $x = 3,343$ м

$$N = H \cdot \cos \alpha + Q^b \cdot \sin \alpha = 230,0 \cdot \cos 9,15^\circ + 37,4 \cdot \sin 9,15^\circ = 233 \text{ кН.}$$

Примем сечение радиального ребра из 2 [18 ($A_{\text{шс}} = 20,7 \text{ см}^2$; $J_x = 1090 \text{ см}^4$).

Вычислим геометрические характеристики сечения радиального ребра, включая полосу обшивки (рис. 6.11).

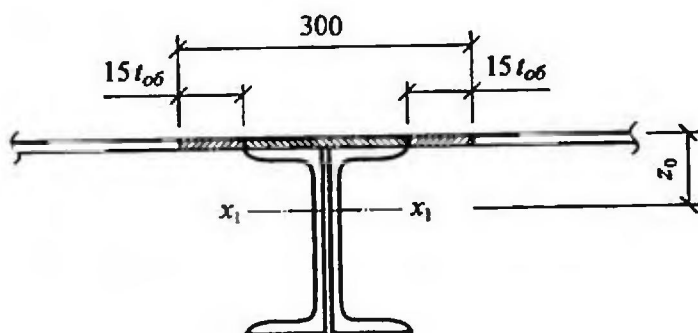


Рис. 6.11. Расчетное сечение радиального ребра поршня

Положение центра тяжести сечения ребра

$$z_0 = \frac{\sum S_i}{\sum A_i} = \frac{30,0 \cdot 0,5 \cdot 0,25 + 2 \cdot 20,7 \cdot 9,5}{30,0 \cdot 0,5 + 2 \cdot 20,7} = 7,04 \text{ см.}$$

Момент инерции сечения относительно оси $x_1 - x_1$

$$J_{x_1} = 2 \cdot 1090 + 2 \cdot 20,7 \cdot \left(\frac{18}{2} + 0,5 - 7,04 \right)^2 + 30,0 \cdot 0,5 \cdot (7,04 - 0,25)^2 = 3122 \text{ см}^4.$$

Минимальный момент сопротивления

$$W_{x_1, \min} = \frac{3122,0}{18,0 + 0,5 - 7,04} = 273 \text{ см}^3.$$

Проверка сечения радиального ребра на растяжение с изгибом

$$\sigma = \frac{N}{2 \cdot A_{\text{изб}}} + \frac{M_{\max}}{W_{x_1, \min}} = \frac{233,0}{2 \cdot 20,7} + \frac{41,6 \cdot 10^2}{273,0} = 20,9 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность сечения ребра достаточна.

Сечение ребра из 2 [16 приводит к небольшому перенапряжению, что не разрешается.

Промежуточные кольца днища поршня разрезаны радиальными ребрами на отдельные элементы, которые можно считать работающими только на изгиб. Наибольший момент в элементе кольца длиной

$$b_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot (r_n - 1,8 \cdot f / 2)}{n_p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot (15,05 - 1,8 \cdot 2,8 / 2)}{16} = 4,92 \text{ м}$$

определяется по формуле (6.20)

$$M_g = \frac{q_1 \cdot b_1}{6},$$

где

$$q_1 = \frac{[P_{\text{изб}} - 0,9 \cdot (g_{p_1} + q_{\text{с.с.}})] \cdot b_1 \cdot a}{2} =$$
$$= \frac{[1,2 \cdot 4,0 - 0,9 \cdot (0,228 + 0,385)] \cdot 4,92 \cdot 2,5}{2} = 26,1 \text{ кН.}$$

$$M_g = \frac{26,1 \cdot 4,92}{6} = 21,4 \text{ кН·м.}$$

Требуемый момент сопротивления сечения элемента кольца

$$W_{\text{тр}} = \frac{M_g}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{21,4 \cdot 10^2}{1,0 \cdot 24,0} = 89,2 \text{ см}^3.$$

Принимаем [16 ($W_x = 93,4 \text{ см}^3 > 89,2 \text{ см}^3$).

Опорное кольцо поршня воспринимает нагрузку в виде распоров от радиальных ребер, вызванных нагрузкой на радиальные ребра. Интенсивность нагрузки на радиальное ребро у опорного кольца определяется по формуле

$$q_k = q_{\text{изб}}^0 - \gamma_{f_0} \cdot K \cdot q_{\text{пок}}^0,$$

здесь $q_{\text{изб}}^0$ и $q_{\text{пок}}^0$ – интенсивности нагрузок в виде избыточного давления и собственного веса покрытия у опорного кольца (по краю поршня);

$$q_{\text{изб}}^0 = \gamma_{f_2} \cdot P_{\text{изб}}^n \cdot b_0 = 1,2 \cdot 4,0 \cdot 5,91 = 28,4 \text{ кН/м.}$$

Собственный вес покрытия поршня (на 1 м^2) складывается из следующих составляющих:

а) собственный вес радиальных ребер (2 [18) по формуле (6.24)

$$g_{p_1} = \frac{g_p \cdot n_p}{2 \cdot \pi \cdot r_n^2} = \frac{(1,05 \cdot 2 \cdot 16,3 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 15,05) \cdot 16}{2 \cdot 3,14 \cdot 15,05^2} = 0,114 \text{ кН/м}^2;$$

б) собственный вес промежуточных колец ([16)

$$g_k = \frac{g_{ув}}{a} = \frac{1,05 \cdot 14,2 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}{2,5} = 0,058 \text{ кН/м}^2;$$

в) расчетный собственный вес обшивки толщиной 5 мм

$$g_{об} = 1,05 \cdot t_{об} \cdot \rho_{ст} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 1,05 \cdot 0,005 \cdot 7850 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 0,404 \text{ кН/м}^2;$$

г) собственный вес кронштейнов – учтем приближенно коэффициентом $K = 1,2$.

Суммарная интенсивность постоянных нагрузок у опорного кольца

$$q_{пок}^0 = (g_{p_1} + g_k + g_{об}) \cdot b_0 = (0,114 + 0,058 + 0,404) \cdot 5,91 = 3,4 \text{ кН/м}.$$

Результирующая интенсивность нагрузки у опорного кольца

$$q_k = 28,4 - 0,9 \cdot 1,2 \cdot 3,4 = 24,7 \text{ кН/м}.$$

Распор определяется по формуле

$$H_k = \frac{q_k \cdot r_n^2}{6 \cdot f} = \frac{24,7 \cdot 15,05^2}{6 \cdot 2,8} = 333 \text{ кН}.$$

Максимальный изгибающий момент в сечении опорного кольца по формуле (3.56)

$$M_{\max} = \frac{H_k \cdot r_n}{2} \cdot \left(\frac{n_p}{\pi} - \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n_p} \right) = \frac{333,0 \cdot 15,05}{2} \cdot \left(\frac{16}{3,1416} - \operatorname{ctg} \frac{180^\circ}{16} \right) = 164 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Продольное усилие в сечении опорного кольца по формуле (3.58)

$$N_k = \frac{H_k}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\pi}{n_p}} = \frac{333,0}{2 \cdot \sin \frac{180^\circ}{16}} = 854 \text{ кН}.$$

Сечения опорных колец поршня могут быть различными. Путем последовательных приближений принято сечение опорного кольца в виде прямоугольника с размерами, указанными на рис. 6.12.

Вычислим геометрические характеристики сечения опорного кольца.

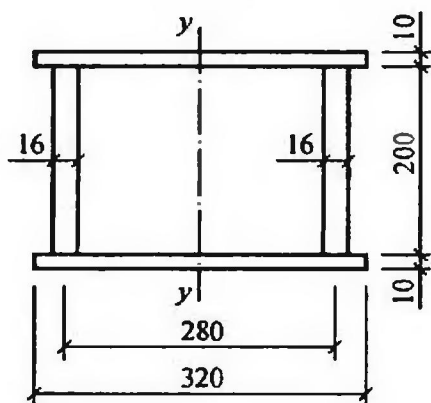


Рис. 6.12. Сечение опорного кольца

$$A_k = 2 \cdot (1 \cdot 32 + 1,6 \cdot 20) = 128 \text{ см}^2;$$

$$J_y = 2 \cdot \left(\frac{1 \cdot 32^3}{12} + 1,6 \cdot 20 \cdot 14^2 \right) = 18005 \text{ см}^4;$$

$$W_y = \frac{18005}{16} = 1125 \text{ см}^3.$$

Проверка опорного кольца на прочность по формуле (6.34)

$$\sigma = \frac{N_k}{A_k} + \frac{M_{\max}}{W_y} = \frac{854}{128} + \frac{164 \cdot 10^2}{1125} = 21,25 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Найдем величину пригруза на поршень G_{npz} для обеспечения заданного нормативного избыточного давления равного 4,0 кПа. По формуле (6.35) величина пригруза определяется, как разность между суммарным избыточным давлением на поршень $G_{изб}$ и собственным весом поршня G_n .

$$G_{изб} = \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}^H \cdot \pi \cdot r_n^2 = 1,2 \cdot 4,0 \cdot 3,14 \cdot 15,05^2 = 3414 \text{ кН}.$$

Собственный вес поршня:

а) вес 16-ти радиальных ребер

$$G_p = 2 \cdot g_{шв} \cdot g \cdot 10^{-3} \cdot r_n \cdot 16 = 2 \cdot 16,3 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 15,05 \cdot 16 = 77 \text{ кН};$$

б) вес 5-ти промежуточных колец жесткости

$$G_{нк} = 14,2 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot (12,5 + 10,0 + 7,5 + 5,0 + 2,5) = 33 \text{ кН};$$

в) вес опорного кольца

$$G_{он} = 148 \cdot 10^{-6} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 15,05 \cdot 7850 = 1,0 \text{ кН};$$

г) расчетный вес обшивки

$$\begin{aligned} G_{об} &= 1,05 \cdot t_{об} \cdot \pi \cdot r_n^2 \cdot \rho_{ст} \cdot g \cdot 10^{-3} = \\ &= 1,05 \cdot 0,005 \cdot 3,14 \cdot 15,05^2 \cdot 7850 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 274 \text{ кН}; \end{aligned}$$

д) вес кронштейнов и центрального кольца учтем коэффициентом $K_{кр} = 1,3$.

$$\text{Тогда } G_n = 1,3 \cdot (G_p + G_{нк} + G_{он}) + G_{об} = 1,3 \cdot (77 + 33 + 1) + 274 \approx 420 \text{ кН}.$$

Величина пригруза

$$G_{npz} = G_{изб} - 0,9 \cdot G_n = 3414 - 0,9 \cdot 420 = 3036 \text{ кН};$$

или на 1 пог. м

$$q_{npz} = \frac{G_{npz}}{2 \cdot \pi \cdot (r_n - 0,5 \cdot a)} = \frac{3036,0}{2 \cdot 3,14 \cdot (15,05 - 0,5 \cdot 2,5)} = 35 \text{ кН/м}.$$

Сосредоточенная нагрузка от пригруза на один узел кронштейна

$$F_{npz} = \frac{q_{npz}}{2} \cdot \frac{b_0 + b_1}{2},$$

$$\text{где } b_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot (r_n - a)}{n_p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot (15,05 - 2,5)}{16} = 4,93 \text{ м.}$$

$$F_{np2} = \frac{35}{2} \cdot \frac{5,91 + 4,93}{2} = 95 \text{ кН.}$$

Расчетная схема кронштейна показана на рис. 6.7. Со стороны арки радиального ребра передается на узел 3 кронштейна нагрузка

$$H = 230 \text{ кН и } V = 84 \text{ кН.}$$

Интенсивности нагрузок на кронштейн:

в узле 3

$$q_p = 16,74 \text{ кН/м} \approx 17,0 \text{ кН/м;}$$

в узле 5

$$q'_p = [P_{изб} - 0,9 \cdot (g_{p1} + q_{с.в.})] \cdot b_1 =$$

$$[1,2 \cdot 4,0 - 0,9 \cdot (0,228 + 0,385)] \cdot 4,93 = 21 \text{ кН/м.}$$

в узле 1

$$q_{on} = [1,2 \cdot 4,0 - 0,9 \cdot (0,228 + 0,385)] \cdot 5,91 = 25 \text{ кН/м.}$$

Сосредоточенные силы в нижних узлах кронштейна:

$$V_1 = \frac{1}{4} \cdot (q'_p + 3 \cdot q_p) \cdot 0,5 \cdot a = \frac{(21 + 3 \cdot 17) \cdot 0,5 \cdot 2,5}{4} = 22,5 \text{ кН;}$$

$$V_2 = q'_p \cdot a = 21 \cdot 2,5 = 52,5 \text{ кН;}$$

$$V_{on} = q_{on} \cdot 0,5 \cdot a = 25 \cdot 0,5 \cdot 2,5 = 31 \text{ кН.}$$

Размеры кронштейна показаны на рис. 6.13.

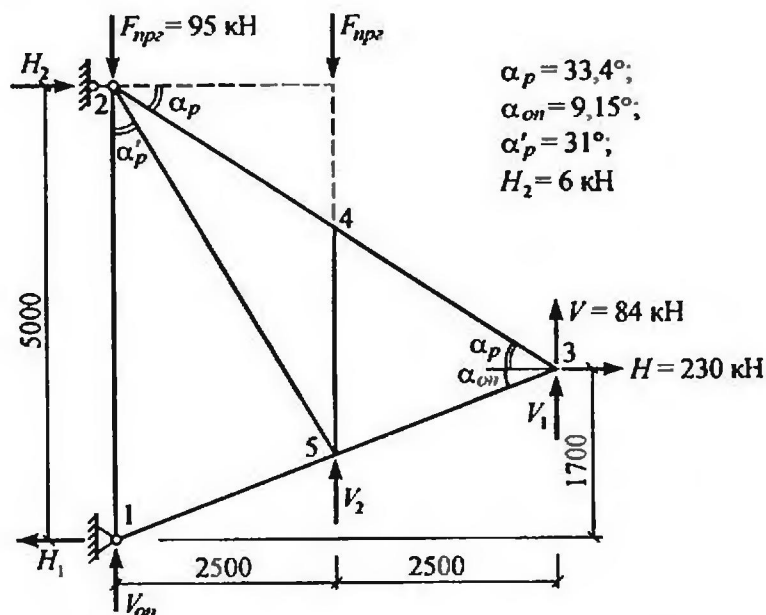


Рис. 6.13. Схема кронштейна с нагрузками

Усилия в стержнях кронштейна определяем методом вырезания узлов. Из рассмотрения равновесия узла 3 получим: $N_{2-3} = -104 \text{ кН}$, $N_{4-5} = -95 \text{ кН}$; узла 2: $N_{1-2} = -145 \text{ кН}$, $N_{2-5} = 134 \text{ кН}$.

Результаты подбора сечений стержней:

- стержень 1–2: $\angle 18$;
- стержень 2–3: $2 \angle 80 \times 80 \times 7$;
- стержень 4–5: $2 \angle 63 \times 63 \times 5$;
- стержень 2–5: $2 \angle 63 \times 63 \times 5$.

Сечения стержней получены с учетом предельных гибкостей.

6.3. СУХОЙ ГАЗГОЛЬДЕР С ГИБКОЙ СЕКЦИЕЙ

С целью устранения контакта газа с газгольдерным маслом и другими жидкостями для хранения газов высокой концентрации разработаны конструкции сухих газгольдеров, имеющих гибкую секцию (мембрану), заменяющую затвор. Газгольдеры с гибкой стенкой изготавливают малой емкостью ($V = 600 \dots 10000 \text{ м}^3$) в сравнении с поршневыми газгольдерами. Давление газа в газгольдере не превышает 5 кПа.

Сухой газгольдер с гибкой стенкой имеет следующие основные части (рис. 6.14):

- цилиндрическую стенку;
- днище, опирающееся на песчаное (искусственное) основание с гидрофобным слоем сверху;
- каркасный цилиндр с днищем, называемый шайбой;
- гибкую секцию;
- сферическое покрытие.

Стенка выполняется в виде рулонных заготовок из листов толщиной 5 мм, сваренных встык. Максимальная высота стенки типового газгольдера принята равной 17,9 м. Для повышения устойчивости стенка с наружной стороны укрепляется несколькими ярусами горизонтальных колец жесткости из швеллеров через 3,0 м, гнутых в плоскости максимальной жесткости.

Днище также изготавливается в виде двух рулонных заготовок из листов толщиной 6 мм и соединяется со стенкой двумя угловыми кольцевыми швами, и располагается на песчаном основании.

Покрытие состоит из несущего каркаса в виде гнутых по радиусу стропил (ребер) из двутавров или швеллеров, между которыми располагают распорки из швеллеров, образующих кольца. Кровля покрытия выполняется из тонколистовой стали толщиной 5 мм, которая крепится к каркасу покрытия проплавным швом. По периметру кровли устраивают опорное кольцо, либо уторный уголок с кольцевой окрайкой из листов толщиной 6–8 мм для восприятия распоров от стропильных ног. Возможны и другие варианты покрытия, например, в виде отдельных готовых криволинейных щитов, или конусный из плоских щитов.

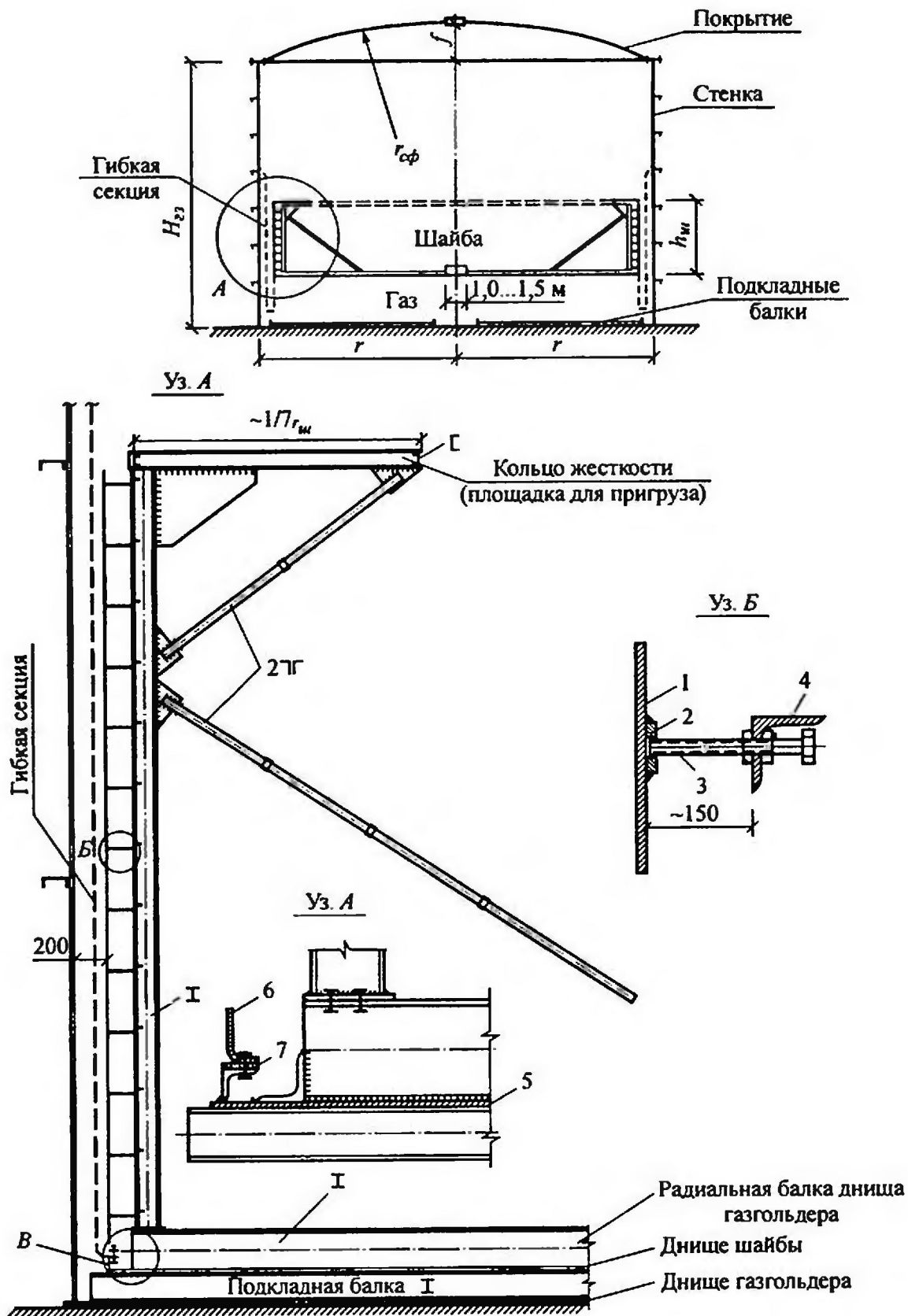


Рис. 6.14. Основные узлы шайбы сухого газгольдера

Элементы сферического покрытия рассчитывают и конструируют так же, как и покрытие сухого газгольдера поршневого типа, колокола мокрого газгольдера.

Шайба состоит из следующих частей (рис. 6.14):

- обшивки днища;
- каркаса днища;
- защитной стенки;
- каркаса защитной стенки.

Днище шайбы представляет собой рулонную заготовку из двух половинок из листов толщиной 5 мм. Днище шайбы воспринимает давление газа, поэтому должно быть герметичным. Несущий каркас днища состоит из радиально расположенных прокатных двутавровых балок, к которым снизу приваривается днище. Балки сходятся в середине днища на центральном кольце. В кольцевом направлении балки связывают распорками из уголков. По периметру днища шайбы приварены два кольца из уголков. Один уголок предназначен для крепления на болтах и прокладках нижней части гибкой секции из прорезиненной ткани к днищу. Второй уголок соединяет между собой торцы радиальных балок.

Цилиндрическая защитная стенка шайбы служит опорной поверхностью, на которую опирается гибкая секция при наполнении газгольдера газом. Давление от защитной стенки передается на стойки вертикального несущего каркаса шайбы. По верху стоек предусматривается кольцевая площадка в горизонтальной плоскости, работающая как сжатое кольцо.

Вертикальный несущий каркас шайбы состоит из прокатных двутавров и горизонтальных колец из гнутых уголков, на которые через специальные болты опирается защитная стенка (рис. 6.14). Толщина листов защитной стенки 3 мм.

Предохранительная защитная стенка конструируется в виде отдельных щитов. Каждый щит представляет собой плоскость, состоящую из двух листов, сваренных между собой. Щиты крепят на горизонтальных кольцах

из уголков специальными болтами, регулируя которые при установке щитов защитной стенке придают цилиндрическое очертание. Болты располагают в горизонтальной плоскости на расстоянии примерно 500 мм, а в вертикальной плоскости – в соответствии с шагом горизонтальных колец (~ 1000 мм).

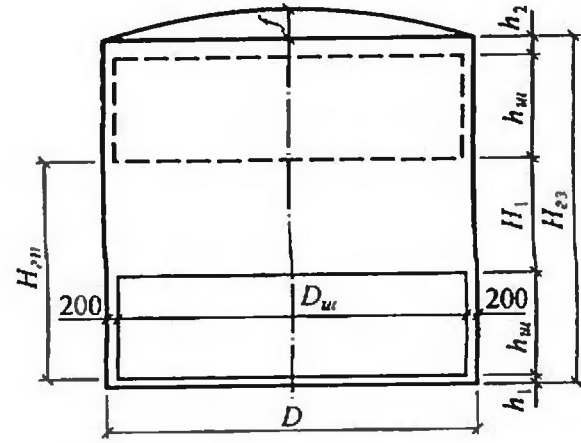


Рис. 6.15. Геометрическая схема газгольдера с гибкой секцией

Габаритные размеры газгольдера (рис. 6.15) назначают в зависимости от заданной емкости V . Диаметр газгольдера определяется по формуле

$$D \approx 1,5 \cdot \sqrt[3]{V}. \quad (6.38)$$

Высота газгольдера:

$$\begin{aligned} \text{при } V = 600 \dots 1000 \text{ м}^3 \quad H_{23} &= 11930 \text{ мм}; \\ \text{при } V = 3000 \dots 10000 \text{ м}^3 \quad H_{23} &= 17900 \text{ мм}; \\ h_1 &\approx h_2 = 200 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Высота газового пространства: $H_{2n} = h_{ш} + H_1$,

$$\begin{aligned} \text{при } V = 600 \dots 1000 \text{ м}^3 \quad H_{2n} &= 7200 \text{ мм}; \\ \text{при } V = 3000 \dots 10000 \text{ м}^3 \quad H_{2n} &= 11160 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Высота шайбы:

$$\begin{aligned} h_{ш} &= 3800 \text{ мм при } V = 600 \dots 1000 \text{ м}^3; \\ h_{ш} &= 5780 \text{ мм при } V = 3000 \dots 10000 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Номинальный объем газгольдера с гибкой секцией определяется по формуле

$$V_{н.мн} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H_{2n}. \quad (6.39)$$

Стенка газгольдера воспринимает два варианта нагрузок:

1) при заполненном газгольдере избыточное давление в кольцевом направлении (σ_2) и вертикальную нагрузку от собственного веса оборудования, покрытия и снега на нем в направлении образующей оболочки (σ_1);

2) при порожнем газгольдере ветровую нагрузку в виде условного вакуума в кольцевом направлении (σ_2) и вертикальную нагрузку от собственного веса оборудования, покрытия и снега на нем (σ_1).

Толщиной стенки газгольдера задаются (4...5 мм) и проверяют ее на прочность при первом варианте загрузки и на устойчивость при втором варианте. На прочность стенка проверяется по формуле

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \leq \gamma_c \cdot R_y, \quad (6.40)$$

а также по формуле (2.36).

При проверке на устойчивость стенки следует учитывать наличие горизонтальных колец жесткости, устанавливаемых, примерно, через 3 м по высоте стенки. При емкости газгольдера более 500 м³ шаг колец жесткости меньше 0,5 · r. В СНиПе II-23-81* отсутствует рекомендация по расчету круговой цилиндрической оболочки на устойчивость в кольцевом направлении при шаге колец жесткости меньше 0,5 · r. Поэтому в данном случае на устойчивость стенки в кольцевом направлении будем проверять только кольцо жесткости, включая участки стенки шириной $0,65 \cdot t \cdot \sqrt{E/R_y}$ с каждой стороны от оси ребра, как центрально сжатый стержень по формуле

$$\frac{N_{\sigma}}{\varphi \cdot A} \leq \gamma_c \cdot R_y, \quad (6.41)$$

где A — площадь сечения кольца жесткости совместно с участками стенки;

$$N_{\sigma} = q_{\sigma} \cdot a \cdot r,$$

q_0 – ветровая нагрузка в виде условного вакуума;

a – шаг колец жесткости;

$l_{ef} = 1,8 \cdot r$ – расчетная длина кольца жесткости.

При этом условная гибкость кольца $\bar{\lambda}$ не должна превышать 6,5 [28]. Момент инерции кольца жесткости следует вычислять относительно оси, совпадающей с ближайшей поверхностью стенки.

Проверка стенки газгольдера на устойчивость вдоль образующей производится по формуле (2.5).

Основными расчетными элементами каркаса шайбы являются:

- 1) радиальные балки днища;
- 2) кольцевой уголок защитной стенки;
- 3) вертикальная стойка каркаса шайбы;
- 4) кольцо жесткости шайбы.

Основными нагрузками на элементы каркаса шайбы являются:

- 1) избыточное давление газа;
- 2) собственный вес элементов шайбы;
- 3) вес пригруза.

Сначала следует определить величину пригруза, исходя из заданного значения избыточного давления газа. При этом собственный вес шайбы в целом назначается приближенно по аналогии с типовыми решениями. После расчета и конструирования шайбы уточняется ее вес. Приближенно можно принять вес шайбы равным 1/3 веса всего газгольдера, т.е. $G_{ш} \approx 1/3 \cdot G_{гг}$. Веса газгольдеров в зависимости от емкости приведены в приложении (П10, П11).

Количество радиальных балок днища шайбы назначают, исходя из условий размещения их на центральном кольце. Принимая шаг балок у центрального кольца b_y и радиус центрального кольца r_y , число балок пролетом $2 \cdot r$ будет равно

$$n_b = \frac{\pi \cdot r_y}{b_y}. \quad (6.42)$$

Число радиальных балок n_b следует принять кратным двум, т.е. 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, ...

Шаг балок по контуру шайбы

$$b_0 = \frac{\pi \cdot r_{ш}}{n_b}. \quad (6.43)$$

Радиальные балки пролетом $2 \cdot r_{ш}$ опираются на вертикальный каркас шайбы.

Нагрузки на радиальную балку:

- избыточное давление снизу вверх ($q_{изб} = P_{изб} \cdot b_0$);
- собственный вес днища шайбы сверху вниз ($q_{с.в.} = g_{с.в.} \cdot b_0$);
- пригруз сверху вниз в виде сосредоточенных сил (рис. 6.16).

Положение грузов по концентрическим окружностям необходимо определить так, чтобы существенно уменьшить изгибающие моменты в ради-

альных балках шайбы. Количество концентрических окружностей рекомендуется принимать:

при $V = 10000 \text{ м}^3$ – 4 шт.;

при $V = 6000 \text{ м}^3$ – 3 шт.;

при $V \leq 3000 \text{ м}^3$ – 2 шт.

При этом желательно, чтобы по всем концентрическим окружностям интенсивность пригруза $q_{\text{прг}}$ была одинаковой во избежание ошибочного расположения грузов. Для примера на рис. 6.16 показано расположение грузов газгольдера емкостью 10000 м^3 с равными интенсивностями по трем внутренним концентрическим окружностям, кроме крайней (при $r = r_{\text{ш}}$; $r_{\text{ш}}$ – радиус шайбы).

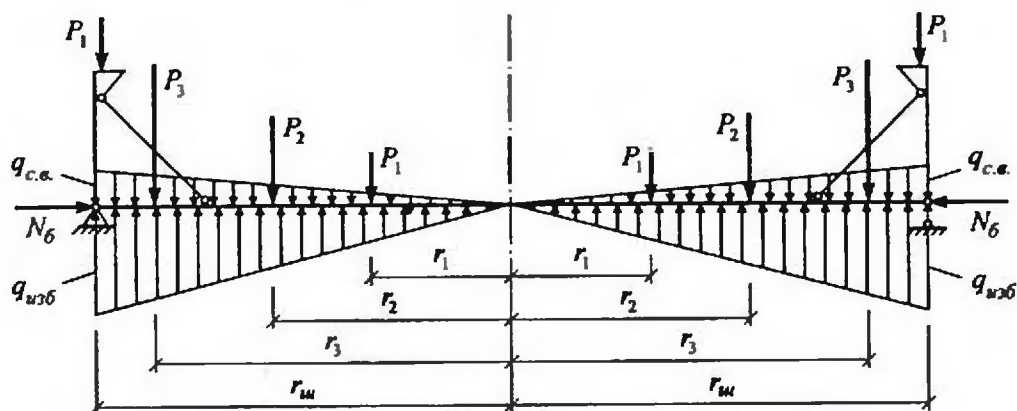


Рис. 6.16. Расчетная схема радиальной балки днища шайбы

Расположение грузов соответствует

$$r_1 = 0,3 \cdot r_{\text{ш}}; \quad r_2 = 1,8 \cdot r_1; \quad r_3 = 2,7 \cdot r_1.$$

Соотношение грузов

$$P_1 : P_2 : P_3 = 1 : 1,8 : 2,7, \text{ т.е. } P_2 = 1,8 \cdot P_1, \quad P_3 = 2,7 \cdot P_1.$$

Суммарная величина пригруза

$$G_{\text{прг}} = \pi \cdot r_{\text{ш}}^2 \cdot (P_{\text{шб}} - P_{\text{с.в.}}), \quad (6.44)$$

где $P_{\text{с.в.}}$ – собственный вес конструкций шайбы на 1 м^2 , который приближенно можно определить, как для колокола мокрого газгольдера.

Сосредоточенные грузы определяются по формулам

$$P_1 = \frac{q_{\text{прг}} \cdot \pi \cdot r_1}{n_6} = \frac{q'_{\text{прг}} \cdot \pi \cdot r_{\text{ш}}}{n_6}; \quad P_2 = \frac{q_{\text{прг}} \cdot \pi \cdot r_2}{n_6}; \quad (6.45)$$

$$P_3 = \frac{q_{\text{прг}} \cdot \pi \cdot r_3}{n_6},$$

где $q'_{\text{прг}} = 0,3 \cdot q_{\text{прг}}$ – интенсивность грузов по краю шайбы.

Интенсивность грузов q_{npz} определяется из условия равенства суммарной величины пригруза сумме грузов по всем концентрическим окружностям, т.е.

$$G_{npz} = q_{npz} \cdot \pi \cdot (0,3 \cdot r_{ui} + r_1 + r_2 + r_3) = \\ = 2 \cdot q_{npz} \cdot \pi \cdot (0,3 \cdot r_{ui} + 0,3 \cdot r_{ui} + 1,8 \cdot 0,3 \cdot r_{ui} + 2,7 \cdot 0,3 \cdot r_{ui}) = 3,9 \cdot \pi \cdot q_{npz} \cdot r_{ui};$$

отсюда

$$q_{npz} = \frac{G_{npz}}{3,9 \cdot \pi \cdot r_{ui}}. \quad (6.46)$$

При $V = 6000 \text{ м}^3$ концентрическую окружность радиуса r_1 можно убрать, оставив три окружности.

Наибольший изгибающий момент будет располагаться в середине пролета радиальной балки, т.е. в центре днища. Возможны и другие варианты распределения концентрических окружностей и грузов по днищу шайбы.

Избыточное давление газа через защитную стенку передается в виде продольной силы N_6 на радиальные балки

$$N_6 = 0,5 \cdot h_{cm} \cdot b_0 \cdot P_{изб}. \quad (6.47)$$

В итоге имеем радиальные балки, работающие на сжатие с изгибом. Причем относительный эксцентриситет в расчетном сечении радиальной балки имеет значительную величину (более 15), что разрешает вести расчет радиальной балки на прочность

$$\sigma = \frac{N_6}{A} + \frac{M}{W_x} \leq \gamma_c \cdot R_y. \quad (6.48)$$

В состав сечения балки следует включить лист днища шайбы шириной $15 \cdot t$ по обе стороны от края нижних полок двутавра.

Расчетной схемой кольцевого уголка защитной стенки является двухшарнирная арка пролетом, равным расстоянию между вертикальными стойками b_0 , и нагруженная равномерно распределенной по дуге арки нагрузкой q_a от избыточного давления газа (рис. 6.17)

$$q_a = P_{изб} \cdot a, \quad (6.49)$$

где a – шаг кольцевых ригелей защитной стенки;

$$a = 1000 \dots 2000 \text{ мм.}$$

Стрела подъема арки f определяется по формуле

$$f = \frac{b_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{4} \right), \quad (6.50)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{360^\circ}{2 \cdot n_6}.$$

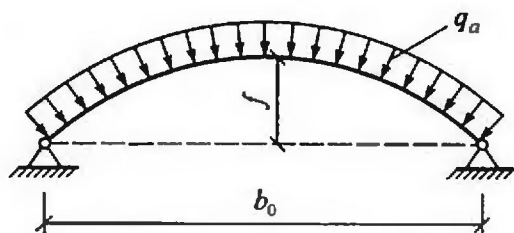


Рис. 6.17. Расчетная схема кольцевого ригеля каркаса шайбы

Круговая арка с равномерно распределенной радиальной нагрузкой q_a воспринимает только продольное усилие N_a и проверяется на устойчивость по формуле (6.7), где

$$N_a = q_a \cdot r_{ш}.$$

Вертикальные стойки каркаса шайбы, воспринимая избыточное давление газа, работают на изгиб, как балка пролетом равным, примерно, $0,8 \cdot h_{ш} + h_k$ (рис. 6.18), без учета работы раскосов (достаточно гибких).

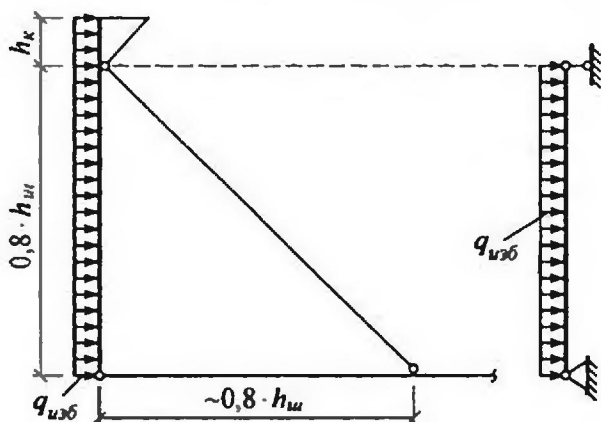


Рис. 6.18. Расчетная схема вертикальной стойки каркаса шайбы

Кольцо жесткости каркаса шайбы, располагаемое в горизонтальной плоскости поверху шайбы, воспринимает избыточное давление газа с верхней половины высоты шайбы и работает на осевое сжатие. Конструктивно кольцо жесткости может быть выполнено сквозного сечения: пояса из прокатных швеллеров и треугольной решетки из прокатных уголков.

Интенсивность равномерно распределенной радиальной нагрузки на кольцо определяется по формуле

$$q_k = P_{uzb} \cdot h_{ш} / 2. \quad (6.51)$$

Кольцо следует проверить на устойчивость в своей плоскости по формуле

$$N_k = q_k \cdot r_{ш} \leq N_{cr} = \frac{3 \cdot E \cdot J_y}{r^2}, \quad (6.52)$$

где J_y – момент инерции сечения кольца относительно вертикальной оси;
 r – радиус кольца.

6.4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ СУХОГО ГАЗГОЛЬДЕРА С ГИБКОЙ СЕКЦИЕЙ

Требуется рассчитать основные элементы сухого газгольдера с гибкой секцией номинальной емкости $V = 10000 \text{ м}^3$ для хранения газа под избыточным давлением $P_{uzb}^H = 4 \text{ кПа}$ при эксплуатации его в I-м ветровом и III-м снеговом районах.

6.4.1. Определение габаритных размеров газгольдера

Диаметр газгольдера определяется по формуле (6.38)

$$D = 1,5 \cdot \sqrt[3]{V} = 1,5 \cdot \sqrt[3]{10000} = 32,4 \text{ м.}$$

Принимая длину листа стенки с учетом выравнивания кромок $b_n = 6000 - 8 = 5992$ мм, требуемое количество листов в одной царге

$$n_n = \frac{\pi \cdot D}{b_n} = \frac{3,1416 \cdot 32,4}{5,992} = 16,99 \text{ шт.}$$

Принимаем $n_n = 17$ шт. При этом фактический диаметр газгольдера составит

$$D = \frac{b_n \cdot n_n}{\pi} = \frac{5,992 \cdot 17}{3,1416} = 32,42 \text{ м.}$$

Рекомендуемая высота газгольдера при $V = 10000 \text{ м}^3$: $H_{\text{зз}} = 17900$ мм; высота шайбы: $h_{\text{ш}} = 5780$ мм.

Номинальный объем газгольдера примем равным заданному. Тогда высота газового пространства (рис. 6.15) будет равна

$$H_{\text{zn}} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 10000}{3,1416 \cdot 32,42^2} = 12,114 \text{ м.}$$

6.4.2. Расчет стенки газгольдера

Стенка рассматриваемого типа газгольдера укрепляется только горизонтальными кольцами жесткости. Поэтому будем рассматривать участок стенки между двумя смежными кольцами жесткости. Нагрузками на стенку газгольдера являются избыточное давление газа и собственный вес покрытия со снегом на нем. Избыточное давление газа вызывает растяжение с изгибом стенки, а собственный вес покрытия и снега на нем – сжатие, которое улучшает напряженное состояние стенки. В связи с этим не будем учитывать эти нагрузки, так как собственный вес покрытия будет вызывать несущественные напряжения сжатия, а снеговая нагрузка является временной.

В качестве расчетной схемы стенки газгольдера рассматривается полоска стенки единичной ширины по вертикали в виде многопролетной изгибно-жесткой нити (см. п. 2.4). Примем толщину обшивки стенки $t_{\text{об}} = 5$ мм.

Находим распор нити по формуле (2.34)

$$H = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{изб}}^2 \cdot a^2 \cdot E_1 \cdot t_{\text{об}}}{24}} = \sqrt[3]{\frac{(4,8 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 300^2 \cdot 2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,5}{24}} = 2,14 \text{ кН/см,}$$

где $P_{\text{изб}} = \gamma_{f_2} \cdot P_{\text{изб}}'' = 1,2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-4} = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$;

$a = 3000$ мм – шаг горизонтальных колец;

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

Опорный момент по формуле (2.35)

$$M_{on} = \frac{P_{изб} \cdot a}{2 \cdot K},$$

где $K = \sqrt{\frac{12 \cdot H}{E_1 \cdot t_{об}^3}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 2,14}{2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,5^3}} = 0,0953 \frac{1}{\text{см}}.$

$$M_{on} = \frac{4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 300,0}{2 \cdot 0,0953} = 0,756 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

Проверка стенки на прочность по формуле (2.36)

$$\sigma = \frac{H}{t_{об}} + \frac{6 \cdot M_{on}}{t_{об}^2} = \frac{2,14}{0,5} + \frac{6 \cdot 0,756}{0,5^2} = 22,4 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность обшивки стенки газгольдера обеспечена.

Обшивка передает нагрузку на кольца жесткости. Ветровая нагрузка в виде условного вакуума над шайбой вызывает сжатие колец жесткости стенки. Поэтому кольца жесткости следует проверять на устойчивость при центральном сжатии. Однако ветровая нагрузка незначительная, и сечение колец жесткости определяется предельной гибкостью.

Согласно п. 8.8* [28] условная гибкость кольца $\bar{\lambda}$ не должна превышать 6,5. Поскольку кольцо жесткости является для стенки односторонним ребром (рис. 6.19), его момент инерции следует вычислять относительно оси, совпадающей с ближайшей поверхностью обшивки (оболочки) и включать в сечение кольца участки обшивки шириной $0,65 \cdot t_{об} \cdot \sqrt{E/R_y}$ с каждой стороны от оси ребра.

Расчетная длина кольца жесткости $l_{ef} = 1,8 \cdot r = 1,8 \cdot 16,2 = 29,16 \text{ м}$. Для определения требуемого радиуса инерции сечения кольца используем формулу для определения условной гибкости

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{l_{ef}}{i_{mp}} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 6,5.$$

Отсюда требуемый радиус инерции

$$i_{mp} = \frac{l_{ef}}{6,5} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{29,16 \cdot 10^2}{6,5} \cdot \sqrt{\frac{24,0}{2,06 \cdot 10^4}} = 15,3 \text{ см}.$$

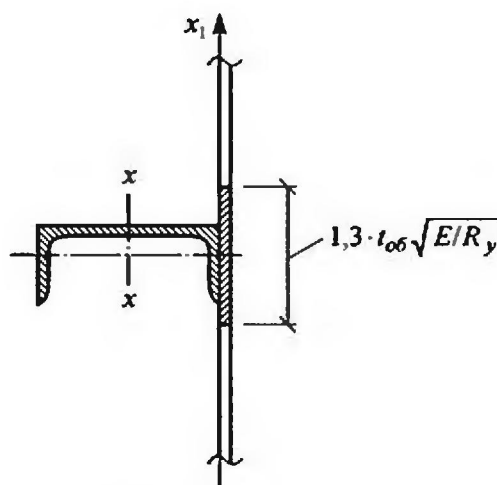


Рис. 6.19. Сечение кольца жесткости стенки газгольдера

Ширина участка обшивки

$$b_{об} = 1,3 \cdot t_{об} \cdot \sqrt{E/R_y} = 1,3 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{2,06 \cdot 10^4 / 24,0} = 19,0 \text{ см.}$$

Номер швеллера определяется методом попыток. Примем [27 ($A_{шв} = 35,2 \text{ см}^2$; $J_x = 4169 \text{ см}^4$).

Момент инерции сечения кольца относительно оси x_1-x_1 (без учета участка обшивки, который практически не влияет на величину момента инерции)

$$J_{x_1} = J_x + A_{шв} \cdot \left(\frac{h_{шв}}{2} \right)^2 = 4160 + 35,2 \cdot \left(\frac{27,0}{2} \right)^2 = 10575 \text{ см}^4.$$

Радиус инерции

$$i_{x_1} = \sqrt{\frac{J_{x_1}}{\sum A}} = \sqrt{\frac{10575,0}{35,2 + 19,0 \cdot 0,5}} = 15,38 \text{ см} \approx i_{mp}.$$

Оставляем для кольца жесткости [27.

6.4.3. Расчет конструкций шайбы (обшивка днища, радиальные балки днища, обшивка защитной стенки, кольцевые ригели защитной стенки, вертикальные стойки защитной стенки)

Обшивка днища крепится на сварке к радиальным балкам и кольцам жесткости и передает им избыточное давление газа. Поэтому вначале следует определить количество радиальных балок и шаг колец жесткости днища. Определяем количество радиальных балок днища пролетом $2 \cdot r_{ш}$ из условия размещения их концов на центральном кольце (рис. 6.20). Принимая расстояние между радиальными балками у центрального кольца $b_y = 150 \text{ мм}$ и радиус центрального кольца $r_y = 1000 \text{ мм}$, количество балок

$$n_6 = \frac{\pi \cdot r_y}{b_y} = \frac{3,1416 \cdot 1000}{150} \approx 21 \text{ шт.}$$

Примем $n_6 = 20 \text{ шт.}$

Пусть шаг колец $a = 3000 \text{ мм}$ и толщина обшивки $t_{об} = 5 \text{ мм}$. Тогда интенсивность нагрузки на полосу обшивки днища единичной ширины

$$\begin{aligned} q_{об} &= q_{изб} - q_{с.в.} = \gamma_{f_2} \cdot P_{изб}^H - t_{об} \cdot \rho_{ст} \cdot g = \\ &= 1,2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-4} - 0,5 \cdot 7850 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} = 4,42 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2. \end{aligned}$$

Примем

$$f_0 = \frac{1}{100} \cdot a = \frac{1}{100} \cdot 300 = 3 \text{ см.}$$

Распор в полоске

$$H = \frac{q_{об} \cdot a^2}{8 \cdot f_0} - \frac{48 \cdot E_1 \cdot J}{a^2} = \frac{4,42 \cdot 10^{-4} \cdot 300^2}{8 \cdot 3} - \frac{48 \cdot 2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,5^3}{12 \cdot 300^2} = 1,53 \text{ кН/см.}$$

Коэффициент податливости

$$K = \sqrt{\frac{H}{E_1 \cdot J}} = \sqrt{\frac{1,53 \cdot 12}{2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,5^3}} = 0,081 \frac{1}{\text{см}}.$$

Опорный момент в сечении полоски

$$M_{он} = \frac{q_{об} \cdot a}{2 \cdot K} = \frac{4,42 \cdot 10^{-4} \cdot 300,0}{2 \cdot 0,081} = 0,8185 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

Проверка полоски на прочность

$$\sigma = \frac{H}{t_{об}} + \frac{6 \cdot M_{он}}{t_{об}^2} = \frac{1,53}{0,5} + \frac{6 \cdot 0,8185}{0,5^2} = 22,7 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Обшивку стенки газгольдера следует проверить на устойчивость вдоль образующей по формуле

$$\sigma_1 \leq \gamma_c \cdot \sigma_{cr1},$$

где $\sigma_1 = \frac{G}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot t_{об}}$; $G = G_{пок} + G_{сн}$,

$$G_{пок} = \bar{g}_{пок} \cdot \pi \cdot r^2,$$

$$\bar{g}_{пок} \approx 0,27 \text{ кН/м}^2 \text{ (см. п. 6.2.4);}$$

$$G_{пок} = 0,27 \cdot 3,14 \cdot 16,2^2 = 223 \text{ кН;}$$

$G_{сн}$ – вес снега на покрытии;

$$G_{сн} = S_g \cdot \mu \cdot \pi \cdot r^2 = 1,8 \cdot 1,0 \cdot 3,14 \cdot 16,2^2 = 1483 \text{ кН;}$$

$$G = 223 + 1483 = 1706 \text{ кН;}$$

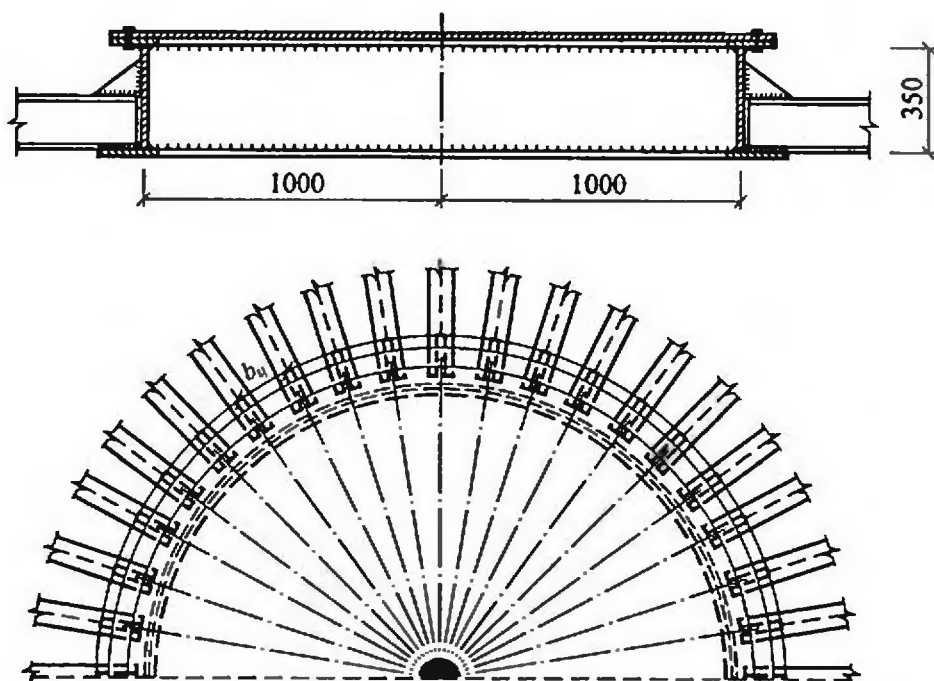


Рис. 6.20. Центральное кольцо днища шайбы

$$\sigma_1 = \frac{1706}{2 \cdot 3,14 \cdot 16,2 \cdot 10^2 \cdot 0,5} = 0,335 \text{ кН/см}^2;$$

$\sigma_{cr1} = \frac{c \cdot E \cdot t}{r}$, так как величина $\psi \cdot R_y$ получается отрицательной,
 $c = 0,055$ – по табл. 31 СНиПа [28].

$$\sigma_{cr1} = \frac{0,055 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 0,5}{16,2 \cdot 10^2} = 0,35 \text{ кН/см}^2 > \sigma_1.$$

Устойчивость обшивки стенки газгольдера обеспечена.

Для расчета радиальных балок необходимо знать величину пригруза, которую приближенно можно принять равной 1/3 от веса газгольдера в целом. По табл. П11 вес типового газгольдера с гибкой стенкой емкостью 10000 м³

$$G_{гз} = 289 \text{ т} = 289 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 2835 \text{ кН}.$$

При этом вес шайбы на 1 м² днища

$$P_{с.ш.} = \frac{G_{гз}}{3 \cdot \pi \cdot r_{ш}^2},$$

где $r_{ш}$ – радиус шайбы;

$$r_{ш} = \frac{D}{2} - 200 \text{ мм} = \frac{32420}{2} - 200 = 16000 \text{ мм} = 16 \text{ м}.$$

$$P_{с.ш.} = \frac{2835}{3 \cdot 3,14 \cdot 16,0^2} = 1,17 \text{ кН/м}^2.$$

Величина пригруза

$$G_{npz} = \pi \cdot r_{ш}^2 \cdot (P_{изб} - P_{с.ш.}) = 3,14 \cdot 16,0^2 \cdot (4,8 - 1,17) \approx 2920 \text{ кН}.$$

Пригруз следует располагать по нескольким концентрическим окружностям с тем, чтобы в радиальных балках свести к минимуму изгибающие моменты. Количество концентрических окружностей для пригруза примем 4 шт. (рис. 6.16). Интенсивность пригруза по формуле (6.46)

$$q_{npz} = \frac{G_{npz}}{3,9 \cdot \pi \cdot r_{ш}} = \frac{2920}{3,9 \cdot 3,14 \cdot 16,0} = 14,9 \text{ кН/м}.$$

Вычислим сосредоточенные силы пригруза P_1, P_2, P_3 , приняв рекомендации:

$$r_1 = 0,3 \cdot r_{ш} = 0,3 \cdot 16 = 4,8 \text{ м}; \quad r_2 = 1,8 \cdot r_1 = 1,8 \cdot 4,8 = 8,64 \text{ м};$$

$$r_3 = 2,7 \cdot r_1 = 2,7 \cdot 4,8 = 13,0 \text{ м},$$

$$P_1 = \frac{q_{npz} \cdot \pi \cdot r_1}{n_6} = \frac{14,9 \cdot 3,14 \cdot 4,8}{20} = 11,23 \text{ кН};$$

$$P_2 = \frac{q_{npz} \cdot \pi \cdot r_2}{n_6} = \frac{14,9 \cdot 3,14 \cdot 8,64}{20} = 20,21 \text{ кН};$$

$$P_3 = \frac{q_{\text{нрг}} \cdot \pi \cdot r_3}{n_6} = \frac{14,9 \cdot 3,14 \cdot 13,0}{20} = 30,41 \text{ кН.}$$

Радиальная балка пролетом $2 \cdot r_{\text{ш}} = 2 \cdot 16 = 32 \text{ м}$ находится в равновесии под действием двух систем вертикальных нагрузок:

- направленные сверху вниз собственный вес днища шайбы по двум треугольникам и сосредоточенные силы P_1 , P_2 и P_3 ;
- направленная снизу вверх от избыточного давления газа $q_{\text{изб}}$ по двум треугольникам (рис. 6.21).

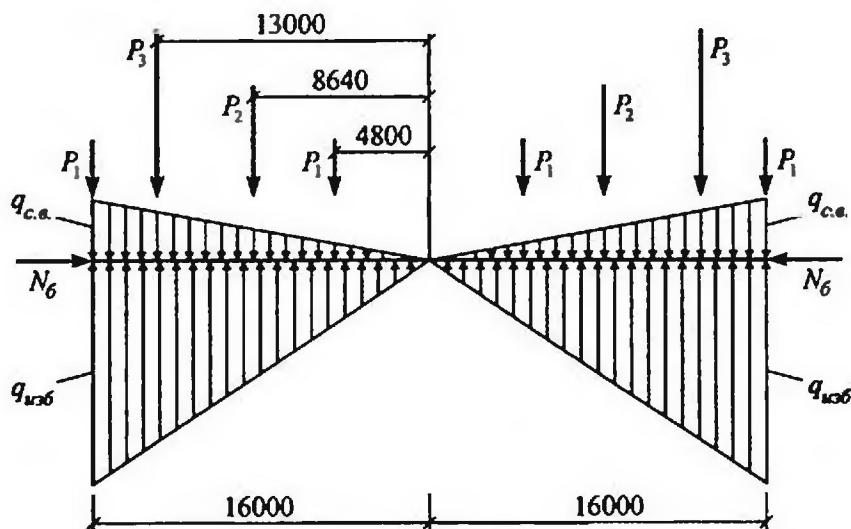


Рис. 6.21. Схема нагрузок на радиальную балку днища шайбы

Интенсивности нагрузок по концам балок:

- от собственного веса днища шайбы

$$q_{\text{с.в.}} = P_{\text{с.в.}} \cdot b_0 = 1,17 \cdot 2,512 = 2,95 \text{ кН/м,}$$

где $b_0 = \frac{\pi \cdot r_{\text{ш}}}{n_6} = \frac{3,14 \cdot 16,0}{20} = 2,512 \text{ м;}$

- от избыточного давления газа

$$q_{\text{изб}} = P_{\text{изб}} \cdot b_0 = 4,8 \cdot 2,512 = 12,06 \text{ кН/м.}$$

Изгибающий момент в середине пролета радиальной балки от нагрузок по рис. 6.21

$$M = \frac{1}{2} \cdot (12,06 - 2,95) \cdot 16,0 \cdot \frac{2}{3} \cdot 16,0 - 11,23 \cdot (16,0 + 4,8) - 30,41 \cdot 13,0 - 20,21 \cdot 8,64 = -26,1 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Защитная стенка с половины своей высоты передает избыточное давление газа на радиальную балку в виде продольного усилия

$$N_6 = 0,5 \cdot h_{\text{ст}} \cdot b_0 \cdot P_{\text{изб}}.$$

Принимая $h_{cm} = 0,8 \cdot h_{ш} = 0,8 \cdot 5,78 = 4,62$ м, получим

$$N_6 = 0,5 \cdot 4,62 \cdot 2,512 \cdot 4,8 = 28 \text{ кН.}$$

В качестве радиальной балки примем прокатный двутавр I 18 ($A_{ос} = 23,4 \text{ см}^2$; $W_x = 143 \text{ см}^3$) и проверим его на сжатие с изгибом

$$\sigma = \frac{N_6}{A_{ос}} + \frac{M}{W_x} = \frac{28,0}{23,4} + \frac{26,1 \cdot 10^2}{143,0} = 19,45 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Расчет обшивки защитной стенки ведем по расчетной схеме изгибно-жесткой нити, т.е. с учетом опорных моментов. Обшивка защитной стенки опирается на кольцевые ригели, расположенные в горизонтальной плоскости, и воспринимает избыточное давление газа через гибкую секцию.

Примем толщину обшивки $t_{об} = 3$ мм и шаг кольцевых уголков $a = 1000$ мм.

Распор по формуле (2.34)

$$H = \sqrt[3]{\frac{P_{изб}^2 \cdot a^2 \cdot E_1 \cdot t_{об}}{24}} = \sqrt[3]{\frac{(4,8 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 100^2 \cdot 2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,3}{24}} = 0,865 \text{ кН/см.}$$

Коэффициент податливости

$$K = \sqrt{\frac{12 \cdot H}{E_1 \cdot t_{об}^3}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 0,865}{2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,3^3}} = 0,13 \frac{1}{\text{см}}.$$

Опорный момент по формуле (2.35)

$$M_{он} = \frac{P_{изб} \cdot a}{2 \cdot K} = \frac{4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 100,0}{2 \cdot 0,13} = 0,185 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}}.$$

Проверка обшивки на прочность

$$\sigma = \frac{H}{t_{об}} + \frac{6 \cdot M_{он}}{t_{об}^2} = \frac{0,865}{0,3} + \frac{6 \cdot 0,185}{0,3^2} = 15,2 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Увеличим шаг кольцевых ригелей и примем $a = 1500$ мм.

Тогда

$$H = \sqrt[3]{\frac{(4,8 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 150^2 \cdot 2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,3}{24}} = 1,135 \text{ кН/см;}$$

$$K = \sqrt{\frac{12 \cdot 1,135}{2,26 \cdot 10^4 \cdot 0,3^3}} = 0,149 \frac{1}{\text{см}};$$

$$M_{он} = \frac{4,8 \cdot 10^{-4} \cdot 150,0}{2 \cdot 0,149} = 0,242 \frac{\text{кН} \cdot \text{см}}{\text{см}};$$

$$\sigma = \frac{1,135}{0,3} + \frac{6 \cdot 0,242}{0,3^2} = 19,9 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Дальнейшее увеличение шага кольцевых ригелей нецелесообразно.

Кольцевые ригели защитной стенки воспринимают через обшивку избыточное давление газа и работают на осевые сжимающие усилия, т.е. на устойчивость. Опорами кольцевых ригелей служат стойки каркаса защитной стенки. Количество стоек каркаса принимается равным удвоенному числу радиальных балок (по две стойки на одну балку), т.е.

$$n_{cm} = 2 \cdot n_b = 2 \cdot 20 = 40 \text{ шт.}$$

Расчетная схема кольцевого ригеля показана на рис. 6.17 в виде двухшарнирной арки. Определяем параметры арки. Пролет арки $b_0 = 2,512$ м. Стрела подъема арки

$$f = \frac{b_0}{2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{4}\right),$$

где $\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{n_{cm}} = \frac{360^\circ}{40} = 9^\circ;$

$$f = \frac{2,512}{2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{9^\circ}{4}\right) = 0,05 \text{ м.}$$

Длина полуарки

$$s = \sqrt{\left(\frac{b_0}{2}\right)^2 + \frac{4}{3} \cdot f^2} = \sqrt{\left(\frac{2,512}{2}\right)^2 + \frac{4}{3} \cdot 0,05^2} = 1,257 \text{ м.}$$

Интенсивность равномерно распределенной нагрузки на ось арки от избыточного давления газа

$$q_a = P_{изб} \cdot a = 4,8 \cdot 1,5 = 7,2 \text{ кН/м.}$$

Продольное усилие в арке

$$N_a = q_a \cdot r_{ш} = 7,2 \cdot 16,0 = 115 \text{ кН.}$$

Критическое продольное усилие в арке

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_x}{(\mu \cdot s)^2},$$

где $\mu = 1,0$ при $f/b_0 = 0,05/2,512 = 0,02$.

Примем сечение ригеля из прокатного уголка $70 \times 70 \times 6$ ($J_x = 37,6 \text{ см}^4$).
Получим

$$N_{cr} = \frac{3,14^2 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 37,6}{(1,0 \cdot 125,7)^2} = 483 \text{ кН.}$$

Условие обеспечения устойчивости арки

$$1,3 \cdot N_a = 1,3 \cdot 115 = 150 \text{ кН} < N_{cr} = 483 \text{ кН} -$$

обеспечивается с большим запасом.

Уменьшим сечение ригеля и примем $\angle 63 \times 63 \times 5$ ($J_x = 23,1 \text{ см}^4$). Тогда

$$N_{cr} = \frac{3,14^2 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 23,1}{(1,0 \cdot 125,7)^2} = 297 \text{ кН} > 1,3 \cdot N_a = 150 \text{ кН}$$

устойчивость арки обеспечена.

Вертикальная стойка защитной стенки опирается нижним концом на радиальную балку, а верхним – на горизонтальное кольцо жесткости защитной стенки и представляет собой балку пролетом $l_{cm} = 0,8 \cdot h_{ш} + h_k$.

Примем $h_k = 2 \text{ м}$. Получим $l_{cm} = 0,8 \cdot 5,78 + 2,0 = 6,62 \text{ м}$.

Интенсивность избыточного давления газа на стойку

$$q_{изб} = P_{изб} \cdot b_0 = 4,8 \cdot 2,512 = 12,06 \text{ кН/м}.$$

Расчетный изгибающий момент в вертикальной стойке

$$M_{cm} = \frac{q_{изб} \cdot l_{cm}^2}{8} = \frac{12,06 \cdot 6,62^2}{8} = 66,0 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Требуемый момент сопротивления сечения стойки

$$W_{mp} = \frac{M_{cm}}{\gamma_c \cdot R_y} = \frac{66,0 \cdot 10^2}{1,0 \cdot 24,0} = 275 \text{ см}^3.$$

Принимаем для вертикальной стойки прокатный двутавр I 24 ($W_x = 289 \text{ см}^3 > W_{mp}$). Для уменьшения сечения вертикальной стойки необходимо законструировать дополнительное кольцо жесткости по середине высоты стойки.

Расчет горизонтального кольца жесткости защитной стенки шайбы выполняется на устойчивость при центральном сжатии от избыточного давления газа.

**Основные показатели вертикальных цилиндрических резервуаров
со стационарным покрытием**

Показатели	Номинальный объем, м ³						
	3000	5000	10000	15000	20000	50000	100000
Диаметр, м	18,98	22,8	34,2	39,9	45,64	60,70	88,70
Высота стенки, м	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	17,95	20,95
Толщина стенки	7+2×6+ +5×5	9×8+ +7+ +5×8	12+11+ +10+ +5×9	11+ +7×10	12+ +7×11	25°+20°+ +4×18°+ +6×14	—
Масса элементов на единицу объема резервуара, кг/м ³ :							
стенки	10,38	10,02	10,06	8,03	7,64	8,80*	6,94
днища	3,91	3,90	4,17	4,33	4,20	3,16	3,40
крыши	4,38	4,17	4,98	4,86	4,80	5,08	6,90
центральной стойки	0,50	0,31	—	—	—	—	—
колец жесткости	—	—	1,27	1,06	1,47	0,66	1,07
прочих элементов	1,78	1,14	0,50	0,33	0,27	0,50	0,50
Общая масса, кг/м ³	20,9	19,5	21,0	18,6	18,4	18,2	23,7

* Стенка из стали класса С 345.

** Стенка из стали марки 16Г2АФ.

Приближенно можно считать, что масса резервуара на 1 м³ номинального объема составляет 20 кг.

Таблица П2

Основные показатели резервуара с плавающей крышей

Показатели	Номинальный объем, м ³			
	10000	20000	50000	100000
Внутренний диаметр, м	34,20	45,64	60,70	88,70
Высота резервуара, м	11,92	11,92	17,95	20,95
Диаметр плавающей крыши, м	33,80	45,24	60,30	88,30
Масса элементов на единицу объема резервуара $g_{эл}$, кг/м ³ :				
— плавающей крыши	5,1	5,0	4,0	4,2
— стенки	9,1	7,3	6,4	6,9
— кольца жесткости	1,0	0,9	0,7	1,1
— прочих элементов	0,5	0,5	0,5	0,5
Общая масса, кг/м ³	18,0	17,2	16,0	15,6

Плотности и избыточные давления некоторых видов нефтепродуктов

Продукт	Плотность, т/м ³	Температура замерзания, °C	$P_{изб}$, кПа при t	
			+ 20 °C	+ 40 °C
Авиационный бензин	0,75...0,77	– 60	26	50
Автомобильный бензин	0,7...0,76	– 60	20	40
Легроин	0,77...0,83	– 60	—	—
Сырая нефть	0,83...1,04	—	8	14
Керосин тракторный	0,82...0,89	– 60	—	—
Керосин осветительный	0,85	– 60	7	15
Авиационные масла	0,90	– 14...– 30	—	—
Дизельное масло	0,90	– 10...– 20	—	—
Автотракторное масло	0,91...0,93	0...– 30	—	—
Крекинг – бензин	0,75	– 60	23	40
Темные нефтепродукты	0,90	—	1	2
Отбензиненная нефть	0,90	—	1	2
Мазут	1,00	—	—	—
Дизельное топливо	0,90	—	0,5	1,0

Таблица П4

Основные характеристики некоторых газов

Название газа	Плотность, кг/м ³	Относительный вес по возду- ху при нормальных условиях
Азот	1,2505	0,967
Аммиак	0,7714	0,597
Аргон	1,7839	1,380
Ацетилен	1,1707	0,906
Водород	0,0899	0,069
Кислород	1,4289	1,105
Метан	0,7168	0,555
Этилен	1,2605	0,975
Природный газ чисто газовых месторождений:		
– Саратовской обл.	0,7830	0,605
– Зап. Украины	0,7370	0,570
Природный газ нефтяных скважин:		
– Баку	0,7100...1,1400	0,550...0,880
– Грозный	1,0600...0,4600	0,820...1,130
– Майкоп	0,8400...1,2300	0,650...0,950
Искусственные горючие газы:		
– водяной газ	0,6900	0,533
– генераторный газ	1,1200...1,1800	0,860...0,920
– доменный газ	1,2770	0,990

Значения коэффициентов надежности по нагрузке

Характеристика нагрузки	γ_f
Собственный вес металлических конструкций	1,05
Гидростатическое давление жидкостей	1,1
Избыточное давление	1,2
Вакуум	1,2
Вес при груза	1,1
Ветровая нагрузка на стены цилиндрических резервуаров при расчете их на устойчивость	0,5

Примечания:

1. Для металлических конструкций, в которых усилия от собственного веса превышают 50% общих усилий, следует принимать $\gamma_f = 1,1$.

2. Ветровая нагрузка условно принимается равномерно распределенной по окружности. Аэродинамический коэффициент следует определять по СНиП 2.01.07-85* [26].

П6

ГОСТ 19903-74*

Горячекатаный листовой прокат (выборка)

$t = 3,0; 3,2; 3,5; 3,8; 3,9; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5;$
 $10,0; 10,5; 11,0; 11,5; 12,0; 12,5; 13,0; 13,5; 14,0; 14,5; 15,0; 15,5; 16,0;$
 $25,5; 26,0; 27,0; 28,0; 29,0; 30,0; 31,0; 32,0; 33,0; 34,0; 36,0; 38,0; 40,0$ мм

Таблица П6

Размеры проката (выборка)

Толщина листа, мм	3,0–5,6	6,0–7,5	8,0–10,5	11,0–12,5	13,0–25,5	26,0–40,0
Ширина листа, мм	600–1800	700–2000	700–2500	1000–2500	1000–2800	1250–3600

Технико-экономические показатели стальных горизонтальных резервуаров для нефтепродуктов (надземные)

Показатель	Номинальный объем, м ³			
	25	50	75	100
Геометрический объем, м ³	26,9	55,5	76,9	101,5
Диаметр, мм	2760	2760	3240	3240
Длина резервуара, мм	4830	9600	9720	12700
Толщина стенки, мм	4	4	4	4
Число колец жесткости, шт.	1	1	2	4
Масса конструкций, т	1,86	3,44	4,23	5,40
Удельный расход металла на 1 м ³ объема, кг	69	62	55	53
Толщина днищ конических (плоских), мм	5 (4)	5 (4)	5 (4)	5 (4)

П8

Перечень государственных стандартов на стальные профили и листовой прокат

1. ГОСТ 27772-88*. Прокат для строительных конструкций. Общие технические условия.
2. ГОСТ 82-70*. Прокат стальной горячекатаный широкополосный универсальный. Сортамент.
3. ГОСТ 103-76*. Полоса стальная горячекатаная. Сортамент.
4. ГОСТ 380-88*. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки.
5. ГОСТ 8239-89. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент.
6. ГОСТ 8240-89. Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент.
7. ГОСТ 8509-93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент.
8. ГОСТ 8510-86*. Уголки стальные горячекатаные неравнополочные. Сортамент.
9. ГОСТ 26020-83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент.
10. ГОСТ 19903-74*. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент.
11. ГОСТ 16523-97. Прокат тонколистовой из углеродистой стали.
12. ГОСТ 19281-89*. Прокат из стали повышенной прочности.

Технико-экономические показатели мокрых газгольдеров с вертикальными направляющими

Показатель	Номинальный объем, тыс. м ³			
	10	15	20	30
Полезный объем, м ³	10078	15134	20280	30360
Диаметр, мм:				
– резервуара	28140	31170	35860	43600
– телескопа	27120	30110	34780	42500
– колокола	26100	29050	39700	41400
Высота, мм:				
– резервуара	9800	11750	11750	11730
– телескопа	9400	11350	11350	11330
– колокола	9400	11350	11350	11330
Полная высота H , мм	27440	33290	33290	33210
Отношение диаметра колокола к его высоте	1,02	0,93	1,08	1,31
Количество направляющих, шт.:				
– внешних	12	12	12	16
– в резервуаре	24	24	24	32
– в телескопе	24	24	24	32
Расход стали, т	291,3	369,4	430,4	642,7
Удельный расход стали на 1 м ³ полезного объема, кг	29,1	24,8	21,5	21,5

Таблица П10

Основные размеры сухих газгольдеров поршневого типа

Номинальная емкость, м ³	Корпус газгольдера		Ход поршня, мм	Давление газа с догрузкой, кПа	Общая масса газгольдера	
	высота, мм	диаметр, мм			всего, т	на 1 м ³ емкости, кг
10000	31185	22842	25200	4	314	31,4
20000	35640	28552	28516	4	421	21,0
30000	47520	30420	39668	4	528	17,6
50000	60885	34260	52969	4	738	14,4
100000	71280	44800	62000	4	1122	11,2

Основные размеры сухих типовых газгольдеров с гибкой секцией

Емкость газгольдера, м ³	Корпус		Шайба		Высота газового пространства, мм	Высота подклад- ных балок, мм	Масса стальных конструк- ций, т	Масса стали на 1 м ³ емкости, кг
	внутренний диаметр, мм	высота, мм	диаметр, мм	высота, мм				
600	10300	11930	990	3800	7200	100	46,5	77,5
1000	13300	11930	12900	3800	7200	100	61,1	61,1
3000	18500	17900	18000	5780	11160	200	118,1	39,5
6000	26200	17900	25800	5780	11160	200	204,2	34,2
10000	33800	17900	33400	5780	11160	200	288,6	28,8

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Афанасьев В.А., Березин В.Л. Сооружение газохранилищ и нефтебаз. – М.: «Недра», 1986. – 324 с.
2. Беляев Б.Ф., Галканов В.А., Кулахметьев Р.Р. Назначение проектной толщины основных металлоконструкций резервуаров для нефти и нефтепродуктов // Промышленное и гражданское строительство. – 1999. – № 5. – С. 25–27.
3. Бессонов В.С. Вертикальный резервуар большой емкости // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1983. – № 2. – С. 5–8.
4. Веревкин С.И., Корчагин В.А. Газгольдеры. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1966. – 239 с.
5. Вольмир А.С. Гибкие пластины и оболочки. – М.: Гостехиздат, 1956.
6. Грудев И.Д. Нелинейный краевой эффект в вертикальном цилиндрическом резервуаре // Промышленное и гражданское строительство. – 1999. – № 5. – С. 23–24.
7. Забавников Б.И. Методические указания и справочные данные к курсовому проекту по листовым конструкциям. – Воронеж: Ротопринт ВИСИ, 1976. – 78 с.
8. Качурин В.К. Теория висячих систем. Статический расчет. – Л.–М.: Госиздат литературы по стр-ву, архитектуре и строительным материалам, 1962. – 223 с.
9. Кондаков Г.П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения // Промышленное и гражданское строительство. – 1988. – № 5. – С. 24–26.
10. Кондаков Г.П. и др. Современное резервуарное оборудование для сокращения потерь при хранении нефти и нефтепродуктов // Промышленное и гражданское строительство. – 2000. – № 5. – С. 33–35.
11. Кулахметьев Р.Р. Предельные состояния и срок службы резервуаров // Промышленное и гражданское строительство. – 2003. – № 6. – С. 28–30.
12. Купрейшвили С.М. Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для транспортирования нефтепродуктов // Промышленное и гражданское строительство. – 2003. – № 6. – С. 25–27.
13. Лессиг Е.Н. и др. Листовые металлические конструкции. – М.: Изд. литературы по строительству, 1970. – 488 с.
14. Липницкий М.Е. Купола (расчет и конструирование). – Л.: Издат. литературы по строительству, 1973. – 128 с.
15. Мандриков А.П. Примеры расчета металлических конструкций. – 2-е изд. М.: Стройиздат, 1991. – 431 с.
16. Металлические конструкции / Под ред. Е.И. Беленя, – 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – 560 с.
17. Металлические конструкции: общий курс: Учеб. для вузов. – 7-е изд. / Под ред. Г.С. Веденникова. – М.: Стройиздат, 1998. – 760 с.
18. Металлические конструкции. В 3-х т. Т.3. Специальные конструкции и сооружения: Учеб. для строит. вузов / Под ред. В.В. Горева. – М.: Высш. шк., 1999. – 544 с.
19. Металлические конструкции. В 3-х т. Т.1. Общая часть. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. В.В. Кузнецова (ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова). – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 576 с.
20. Металлические конструкции. В 3-х т. Т.2. Стальные конструкции зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. В.В. Кузнецова (ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова). – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 512 с.

21. Муртазин М.Р. Принципы формообразования и конструирования новой поплавковой плавающей крыши из рулонных заготовок. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. – Саратов. – 2003. – 16 с.
22. Нехаев Г.А. К вопросу о расчете сопряжения стенки с днищем вертикального цилиндрического резервуара // Известия Тульского государственного университета. Серия «Технология, механика и долговечность строительных материалов, конструкций и сооружений». Выпуск 3. Тула, 2002. – С. 127–131.
23. Овчинников И.Г. и др. Техническая диагностика, эксплуатационная надежность и долговечность вертикальных стальных цилиндрических резервуаров. Уч. пособие. – Саратов: СГТУ, 1999. – 116 с.
24. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – М.: Гостехнадзор России, 2001.
25. Прочность. Устойчивость. Колебания. Т.1. Справочник в трех томах / Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: «Машиностроение», 1968. – 831 с.
26. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. – М.: Мин-во стр-ва РФ, 2003. – 43 с.
27. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий. – М.: Госкомитет СССР по делам строительства, 1986. – 57 с.
28. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Нормы проектирования. – М.: ЦИТП, 1991. – 96 с.
29. Соболев Ю.В. К расчету узла сопряжения стенки с днищем металлического цилиндрического резервуара // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1986. – № 1. – С. 13–18.
30. Соболев Ю.В., Астряб С.М. К расчету мультицилиндрического резервуара // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1981. – № 11. – С. 8–13.
31. Соболев Ю.В., Купрейшвили С.М. Проектирование металлических вертикальных цилиндрических резервуаров минимальной массы // Строительная механика и расчет сооружений. – 1986. – № 1. – С. 17–20.
32. Сопротивление материалов / Под общ. ред. А.Ф. Смирнова, – 2-е изд., переработанное. – М.: «Высшая школа», 1969. – 600 с.
33. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический / Под ред. А.А. Уманского. Книга 1. – М.: Издат-во литературы по строительству, 1972. – 599 с.
34. Шаталов А.А., Ханухов Х.М., Воронежский А.Е. Техническое состояние металлоконструкций мокрых газгольдеров // Промышленное и гражданское строительство. – 1999. – № 5. – С. 28–30.