Расчет элементов резервуара.

*Общие положения.*

Все расчеты выполнены по методу предельных состояний по нормам СССР СНиП 2-23-81\* и СНиП 2.01.07-85 с использованием, изданных в 1994 г норм Украины по проектированию нефтяных резервуаров «ВБН В.2.2-58.2-94». Нормы позволяют выбрать класс сталей для элементов резервуаров, рекомендуют вид сварки и сварочных материалов, метод монтажа, конструктивные решения, типы фундаментов и оснований. Здесь же даются указания по защите резервуаров от коррозии, охране окружающей среды, противопожарным мероприятиям.

*Расчет стенки цилиндрических вертикальных резервуаров.*

1.Однослойная стенка.

Стенка испытывает различные виды воздействий. Гидростатическое и избыточное давление вызывают в ней двухосное растяжение. Снеговая, ветровая нагрузка масса стенки и крыши сжимают стенку.

В резервуарах также возможен вакуум, т.е. нагружение, при котором внешнее давление больше внутреннего. Эта нагрузка вызывает сжатие стенок в радиальном направлении.

Указанные выше нагружения провоцируют в стенке, за исключением особых зон, плоско - напряженное состояние.

Особые зоны называются зонами «краевого эффекта». В них появляются изгибные напряжения, которые быстро затухают. Причины, вызывающие изгибающие моменты вдоль образующих, различные конструктивные элементы, стесняющие деформации от внутреннего давления: сопряжения корпуса и днища, корпуса и кровли, кольцевые ребра, изменение толщины стенки, врезные патрубки и отверстия для люков и т.д.

Алгоритм расчета стенки следующий. Вначале из условия растяжения, вызванного внутренним давлением, определяют толщины обоих поясов. Далее выполняется проверка устойчивости стенки вдоль образующей и в поперечном направлении. В случае необходимости некоторые пояса утолщаются.

Окончательно производится определение усилий «краевого эффекта» и проверка прочности с учетом всех компонент напряженного состояния.

Как известно, напряженное состояние любой оболочки, загруженной внутренним давлением, выражается уравнением Лапласа:

 + =Ry

N1 иN 2 (кн/см) – меридиональное (продольное) и кольцевое усилия в оболочке;

r1 и r2 (см) – главные радиусы кривизны оболочки.

Ру – нормальное давление в определяемом кольцевом сечении оболочки «у», считая снизу.

Ру=Р2 +Ри

где

Р2 =ρ(Н-(n-1)h-a)γf1 (кн/см2) – гидростатическое давление, определяемое для каждого пояса, на расстоянии «а» от нижней кромки пояса.

n- номер пояса стенки, с высотой пояса «h»(см), h=149 см;

а=30 см – сечение пояса, отщитываемое от нижней кромки пояса, где растягивающие напряжения максимальны.

Ри=Ро\*γf2 ;Ро=0,0002 кн/см2 – избыточное давление.

γf1=1,0 и γf2=1,2 – коэффициенты надежности по нагрузке.

ρ=0,0000085 кн/см3 –плотность бензина.

Формула для определения толщины каждого пояса, начиная снизу, по условию прочности кольцевых сварных швов на растяжение:

Tci= γ +C1+C2 (см);

 С1 – припуск на коррозию, определяемый по техническим условиям. Первоначально принимаем 1мм.

С2 – минусовое предельное отклонение по толщине проката, принимаемое по соответствующим стандартам. Здесь =0.

γс – коэффициент условия работы. Для нижнего пояса 0,6, а для остальных 0,7.

R=1995 см – радиус резервуара.

Толщина стенки должна быть не менее 8 мм (для данного резервуара) и быть согласована с сортаментом толстолистовой стали.

Если резервуар будет рулонируемым, то толщина стенки должна быть не более 17 мм.

Сначала подберем толщину стенок резервуара из стали С 255, Ry=24 кн/см2 (табл. 1), а затем из стали С 345, Ry=33,5 (t=2-10) или 31,5 (t=11-20) кн/см2(табл. 2).

Таблица №1. Вариант 1.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер пояса |  Класс стали  | Ри, кн/см2 | Р2, кн/см2 | Ру, кн/см2 | tci, см расч. | tci, мм сорт. |
| 1 | С 255 | 0,00024 | 0,014943 | 0,015183 | 2,203478 | 25 |
| 2 | С 255 | 0,00024 | 0,013677 | 0,013917 | 1,752584 | 18 |
| 3 | С 255 | 0,00024 | 0,01241 | 0,01265 | 1,602188 | 17 |
| 4 | С 255 | 0,00024 | 0,011144 | 0,011384 | 1,451791 | 16 |
| 5 | С 255 | 0,00024 | 0,009877 | 0,010117 | 1,301394 | 14 |
| 6 | С 255 | 0,00024 | 0,008611 | 0,008851 | 1,150997 | 12 |
| 7 | С 255 | 0,00024 | 0,007344 | 0,007584 | 1,0006 | 11 |
| 8 | С 255 | 0,00024 | 0,006078 | 0,006318 | 0,850203 | 9 |
| 9 | С 255 | 0,00024 | 0,004811 | 0,005051 | 0,699806 | 8 |
| 10 | С 255 | 0,00024 | 0,003545 | 0,003785 | 0,549409 | 8 |
| 11 | С 255 | 0,00024 | 0,002278 | 0,002518 | 0,399013 | 8 |
| 12 | С 255 | 0,00024 | 0,001012 | 0,001252 | 0,248616 | 8 |
| Таблица №2. Вариант 2.  |  |
| 1 | C 345 | 0,00024 | 0,014943 | 0,015183 | 1,70265 | 17 |
| 2 | C 345 | 0,00024 | 0,013677 | 0,013917 | 1,359112 | 14 |
| 3 | C 345 | 0,00024 | 0,01241 | 0,01265 | 1,244524 | 14 |
| 4 | C 345 | 0,00024 | 0,011144 | 0,011384 | 1,129936 | 12 |
| 5 | C 345 | 0,00024 | 0,009877 | 0,010117 | 1,015348 | 11 |
| 6 | C 345 | 0,00024 | 0,008611 | 0,008851 | 0,852953 | 10 |
| 7 | C 345 | 0,00024 | 0,007344 | 0,007584 | 0,745206 | 8 |
| 8 | C 345 | 0,00024 | 0,006078 | 0,006318 | 0,637459 | 8 |
| 9 | C 345 | 0,00024 | 0,004811 | 0,005051 | 0,529712 | 8 |
| 10 | C 345 | 0,00024 | 0,003545 | 0,003785 | 0,421965 | 8 |
| 11 | C 345 | 0,00024 | 0,002278 | 0,002518 | 0,314218 | 8 |
| 12 | C 345 | 0,00024 | 0,001012 | 0,001252 | 0,206471 | 8 |

Для обеспечения возможности рулонирования резервуара принимаем 3 Вариант – комбинированную однослойную стенку из сталей С255 и С345 со следующими толщинами стенок:

Таблица № 3.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| N пояса | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Сталь | С345 | С345 | С345 | С345 | С345 | С345 | С345 | С345 | С255 | С255 | С255 | С255 |
| Толщина | 17 | 14 | 14 | 12 | 11 | 10 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |

Проверка устойчивости стенки.

Проверка устойчивости каждого пояса от нагрузок направленных вдоль образующих.

Проверка производится по формуле:

σ1<=γсσcr 1

здесь: γс=1;

σ1= ;

N1=Nк+Nсн+Nв+Np (кн/см2)

-суммарное сжимающее усилие в нижнем сечении каждого пояса от воздействия массы крыши, веса снега, вакуума и массы корпуса расположенного выше рассматриваемого сечения (включая рассматриваемый пояс).

Масса крыши (с учетом оборудования на ней)

Nк= γπ (кн/см);

Масса снега на крыше

Nсн= ππ (кн/см);

S=So γf2 μ k

So=0,5 (кн/м2) нормативное значение веса снегового покрова ;

γf2 =0,7 – коэффициент надежности по нагрузке;

μ=1 – коэффициент, учитывающий конфигурацию кровли;

k=1,2-0,1V=0,7; V=5м/с.

Вакуум.

Nв= γ (кн/см);

Рв=0,000025 (кн/см2)

γf3=1,2.

Масса стенки.

Np= πγ (кн/см);

Масса корпуса расположенного выше рассм. сечения Qc'= \*(12-i+1) (кн);

Масса опорного кольца Qo.k.=210 (кн);

Масса стенки Qc=Vc\*ρ=257715\*7.85\*10-3=2023 кн;

i-номер пояса.

Определение критического напряжения.

Критическое напряжение определяется по формуле:

σcr 1= ,где

Е=21000 кн/см2;

R=1995 см – радиус резервуара;

tci – толщина i-того пояса;

С – коэффициент, определяемый в зависимости от отношения R/tci .

Результаты вычислений сведены в таблице № 4.

Таблица №4.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер пояса | tсi, см | Nк , кн/см | Nсн, кн/см | Nв, кн/см | Nр, кн/см | N1, кн/см | σ1, кн/см2 | R/tc | С | σcr 1 , кн/см2 |
| 1 | 1,7 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,190148 | 0,305348 | 0,179616 | 1173,529 | 0,078 | 1,395789 |
| 2 | 1,4 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,175769 | 0,290969 | 0,207835 | 1425 | 0,072 | 1,061053 |
| 3 | 1,4 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,161389 | 0,276589 | 0,197564 | 1425 | 0,071 | 1,046316 |
| 4 | 1,2 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,147009 | 0,262209 | 0,218508 | 1662,5 | 0,069 | 0,871579 |
| 5 | 1,1 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,132629 | 0,247829 | 0,225299 | 1813,636 | 0,066 | 0,764211 |
| 6 | 0,9 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,118249 | 0,233449 | 0,259388 | 2216,667 | 0,064 | 0,606316 |
| 7 | 0,8 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,10387 | 0,21907 | 0,273838 | 2493,75 | 0,061 | 0,513684 |
| 8 | 0,8 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,08949 | 0,20469 | 0,255863 | 2493,75 | 0,061 | 0,513684 |
| 9 | 0,8 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,07511 | 0,19031 | 0,237888 | 2493,75 | 0,061 | 0,513684 |
| 10 | 0,8 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,06073 | 0,17593 | 0,219913 | 2493,75 | 0,061 | 0,513684 |
| 11 | 0,8 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,04635 | 0,16155 | 0,201938 | 2493,75 | 0,061 | 0,513684 |
| 12 | 0,8 | 0,0612 | 0,0241 | 0,0299 | 0,031971 | 0,147171 | 0,183964 | 2493,75 | 0,061 | 0,513684 |

Устойчивость всех поясов обеспечена.

*Проверка устойчивости стенки на нагрузки, направленные нормально к ее поверхности.*

Стенка может потерять устойчивость от действия вакуума и давления ветра. Устойчивость теряет стенка, находящаяся между точками закрепления. Такими закреплениями являются кольцевые ребра. Если их нет, то стенка может потерять устойчивость между днищем и крышей, т.е. на всю высоту.

Проверка производится по следующей формуле:

σ2<σcr 2\*γс

 Напряжение

σ2= γ ,(кн/см2),где

W=0,5Wo\*K1\*С2

Wo=0,30 кн/м2 – скоростной напор ветра в районе г. Днепропетровска;

К1=1,045 – коэффициент, учитывающий увеличение скоростного напора ветра по высоте (принимаем для местности типа А);

С2=0,9 – аэродинамический коэффициент;

Рвак=0,000025 кн/см2;

γf2=1,2;

R=1995 см – радиус резервуара.

Приведенная толщина стенки определяется для участка стенки, расположенной между точками закрепления:

tпр= Σ (см);

li – длина участка, расположенного между точками закрепления;

hi=149 см – высота пояса;

tci – толщина i-того пояса.

Критическое напряжение определяем по формуле:

σcr 2=0,55\*Е\* \*()^3/2

Е=21000 кн/см2.

Результаты вычислений приведены в таблице № 5.

 Таблица № 5.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  Резервуар  | tпр, см | Li, см | σ2, кн/см2 | σcr2, кн/см2 |  |  |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Без промежуточного ребра жесткости | 1,05 | 1788 | 0,3249 | 0,155606 | уст-ть не обеспечена |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| С ребром жесткости: нижняя часть | 1,214 | 1043 | 0,281009 | 0,33163 | уст-ть обеспечена |
|  верхняя часть | 0,8 | 745 | 0,426431 | 0,248364 | уст-ть не обеспечена |

Так как устойчивость верхней части стенки не обеспечена, необходимо увеличить ее толщину. Примем толщину верхней части стенки 1,0 см, тогда

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Верхняя часть  | 1 | 745 | 0,341145 | 0,3471 | уст-ть обеспечена |

Проверим каждый пояс в отдельности на устойчивость по формуле:

σσ + σσ <=γс , где

γс=1,0;

Таблица № 6.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер пояса | tсi, см | σ1, кн/см2 | σcr 1 , кн/см2 | σ2 , кн/см2  | σcr 2 кн/см2 | ∑ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 1,7 | 0,179616 | 1,395789 | 0,200674 | 3,846783 | 0,170705 |
| 2 | 1,4 | 0,207835 | 1,061053 | 0,243675 | 2,874857 | 0,264429 |
| 3 | 1,4 | 0,197564 | 1,046316 | 0,243675 | 2,874857 | 0,257144 |
| 4 | 1,2 | 0,218508 | 0,871579 | 0,284288 | 2,281372 | 0,352297 |
| 5 | 1,1 | 0,225299 | 0,764211 | 0,310132 | 2,002227 | 0,421066 |
| 6 | 0,9 | 0,259388 | 0,606316 | 0,37905 | 1,481795 | 0,639496 |
| 7 | 0,8 | 0,273838 | 0,513684 | 0,426431 | 1,241822 | 0,817892 |
| 8 | 0,8 | 0,255863 | 0,513684 | 0,426431 | 1,241822 | 0,782899 |
| 9 | 0,8 | 0,237888 | 0,513684 | 0,426431 | 1,241822 | 0,747907 |
| 10 | 0,8 | 0,219913 | 0,513684 | 0,426431 | 1,241822 | 0,712915 |
| 11 | 0,8 | 0,201938 | 0,513684 | 0,426431 | 1,241822 | 0,677924 |
| 12 | 0,8 | 0,183964 | 0,513684 | 0,426431 | 1,241822 | 0,642932 |

Так как все значения 7-го столбца меньше γс, значит устойчивость каждого пояса в отдельности обеспечена.

Окончательно принимаем следующие толщины комбинированной стенки:

Таблица № 7. *Вариант№3.*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер пояса | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Сталь | С345 | С345 | С345 | С345 | С345 | С345 | С345 | С255 | С255 | С255 | С255 | С255 |
| Толщина пояса мм | 17 | 14 | 14 | 12 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

2.Расчет двухслойной стенки.

Двухслойную стенку применяют весьма редко в двух случаях:

для уменьшения толщины стенки с целью использования метода рулонирования;

в изотермических резервуарах, в которых продукт хранится при низких температурах.

Обычно для обеих стенок используют стали одного класса, хотя возможен вариант, когда внутренняя стенка делается из стали более высокого класса.

Величину зазора между стенками d2 принимаем 1 см.

Расчет выполняют в такой последовательности:

В начале выполняется расчет однослойной стенки, с тем, чтобы получить из условия прочности толщины tci всех поясов.

Затем задаемся толщиной дополнительной стенки tgi=0,6 см и классом стали, принимаем сталь С 255.

Определим необходимую толщину основной стенки по формуле:

tci>= γγ +С1 , где

P2=ρ(Н-(i-1)h-30)γf+Роγf – часть нагрузки воспринимаемая основной стенкой;

ρ=0,0000085 кн/см2;

Н=1788 см – высота стенки;

i – номер пояса:

h=149 см – высота пояса;

Р0=0,0002 кн/см2 – избыточное давление;

γf – коэффициент надежности по нагрузке;

R=1995 см – радиус резервуара;

tg=0,6 см – толщина дополнительной стенки;

Е=21000 кн/см2 – модуль Юнга;

d2=1 см – предельный зазор;

γс – коэффициент условия работы.

С1 – припуск на коррозию 0,1 см.

Результаты вычислений приведены в таблице:

Таблица № 8.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер пояса | Р2, кн/см2 | tg,см | tci 0,см | tci 0,ммсортам. |
| 1 | 0,015183 | 0,6 | 1,194716 | 12 |
| 2 | 0,013917 | 0,6 | 1,077741 | 11 |
| 3 | 0,01265 | 0,6 | 0,960766 | 10 |
| 4 | 0,011384 | 0,6 | 0,84379 | 9 |
| 5 | 0,010117 | 0,6 | 0,726815 | 8 |

Так как толщина вышележащих поясов больше, чем определенная, принимаем толщину пятого и четвертого поясов равной 10 мм.

Принимаем следующие толщины поясов двухслойной стенки.

 Таблица №9. *Вариант №4.*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер пояса | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Сталь | С 255 | С 255 | С 255 | С 255 | С 255 | С 255 | С 255 | С 255 | С 255 | С 255 | С 255 | С 255 |
| Толщина мм | 12/ 6 | 11/ 6 | 10/ 6 | 10/ 6 | 10/ 6 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

3. Расчет преднапряженых стенок.

Задаемся типом проволоки, ее диаметром «d», шагом навивки «а».Определяем площадь сечения проволоки

f=π (см2);

Приведенная толщина обмотки

tпр= (см),

а – шаг навивки.

Критическое напряжение стенки, при потере ее устойчивости, вызванное преднапряжением равно:

σcr=0,58( μ\*tci\*tпр)^1/2

Е=21000 кн/см2; R=1995 см – радиус резервуара; μ=0,3 – коэффициент Пуассона;

м=Епр/Е; Е – модуль упругости проволоки.

Толщину tci каждого пояса предварительно определяем исходя из расчета однослойной стенки так, чтобы она была меньше 17 мм, что обеспечивает возможность рулонирования.

Задаемся величиной преднапряжения в стенке

σ01=(0,7 – 0,8)σcr

Величина преднапряжения в проволоке будет равна

σпр= σ (кн/см2)

Определяем толщины i – того пояса стенки «tci» и приведенную толщину проволоки «tпр»

tci= γ σσ (см);

tnp= γ σσ (см);

K= ;

Rnp-расчетное сопротивление проволоки.

Диаметр проволоки равен:

D= (π )^1/2 (см)

Если tci сильно (более, чем на 20%) отличается от принятого предварительно, меняем параметры a, tci, d, Rnр и повторен расчет до сходимости (с разницей <=20%).

Окончательно производим проверку напряжений:

σст= μ - σ01<=γcRy ;

σnp= μ + σпр <=γс' Rпр ;

μ=0,3.

Так как стенку можно рулонировать, то оставляем данные параметры, но проволока будет сильно недонапряжена.

С целью экономии материала примем вместо высокопрочной проволоки В-2 проволоку В-1 и повторим расчет.

Rпр=34 кн/см2 ;

Епр=1,7\*104 кн/см2; тогда

к= =1,478;

= =0,8095;

Так как проволока В-1 работает эффективнее проволоки В-2, то оставляем данные параметры.

Расчет узла сопряжения стенки и днища

(«краевой эффект» ).

Расчетная схема нижнего узла сопряжения и основная система метода сил указаны на рисунке №

Канонические уравнения метода сил для определения изгибающего момента «М0» и поперечной силы в оболочке Q0имеют вид:

(δ11с+δ11д)М0+δ12сQ0+ Δ1pс+Δ1pд+Δ1pд(N1)=0;

δ21c М0+δ22сQ0+ Δ2pс =0.

В качестве исходных данных возьмем данные из второго варианта расчета стенки.

tci=1,7 мм; Е=21000 кн/см2 ; R=1995 см; Ry=31,5 кн/см2.

Примем песчаное основание, с коэффициентом постели kg=0,05 кн/см3 ;

Толщина окрайка днища t0=1,4 см. Тогда :

kc= = =0,00896 кн/см3;

Цилиндрическая жесткость стенки определяется по формуле:

Dc= μ=21000\*1,7^3/(12-(1-0,3^2))= 9448,08 (кн см);

Цилиндрическая жесткость днища определяется по формуле:

Dд= μ =21000\*1,4^3/(12\*(1-0,3^2)) = 5276,92 (кн см) ; где

Е=21000 кн/см2 – модуль Юнга;

μ=0,3 – коэффициент Пуассона.

Формулы для определения перемещений:

Стенка.

δ11с= =1/(9448\*0,02206) = 0,0048;

δ12c=δ21c= - =-1/(2\*9448\*0,02206^2) = -0,10875;

δ22c= =1/(2\*9448\*0,02206^3) = 4,92962;

mc= ( )1/4 =(0,00896/(4\*9448))^(1/4) = 0,0220662 (1/см);

Знаки взяты для усилий, указанных на рисунке

Днище.

δ11д= ϕθ =(1+0,965^2+2\*0,8024^2)/(4\*5276,9\*0,0392) = 0,00389032;

 x0=mд с = 0,0392\*5 =0,196;

с=4 – 10 см – величина выступа окрайка за стенку; принимаем с=5 см;

mд=( )1/4 =(0,05/(4\*5276,92))^(1/4) =0,039231;

Значения функций ϕ(x0)=e-xo[cos(x0)+sin(x0)]; θ(x0)=e-xocos(x0) принимаем по приложению № 4.

Грузовые члены Δip взяты со знаками, соответствующими направлению усилий и нагрузок на рис.

Стенка.

Δ1pс= =0,01544/(0,00896\*1788) = 0,0009637664;

Δ2pс= - Δ1pс Нс =-0,000963\*1788 = -1,721844;

 Нс =1788 см полная высота стенки резервуара.

 Ру0=γf1 ρ Hж+γf2 Pи =1\*0,0000085\*1788+1,2\*0,0002 = 0,015438 (кн/см2) – полное расчетное давление на стенку γf1=1, γf2=1,2.

Объемная масса «ρ» и избыточное давление «Ри» определены ранее при расчете стенки; Нж- высота столба жидкости в см, обычно Нж=Нс.

Днище.

Δ1pд= [1-ϕ(x0) ψ(x0)+2 θ(x0) ξ(x0)] = 0,003872;

Значения функций : ξ(x0)=e-xo sin(x0); ψ(x0)=e-xo[cos(x0)-sin(x0)];

 θ(x0)=e-xocos(x0);

принимаем по приложению № 4.

Δ1p(N1)= θ2(x0) =0,2758/(2\*0,0392\*5276,92)\*0,8024= 0,00053492

N1x=N1k+N1c+N1p =0,0612+0,0245+0,19015 =0,27585 кн/см;

N1к=0,0612 кн/см;

N1c=0,0245 кн/см;

N1p=0,19015 кн/см;

Решив систему уравнений получим:

М0=4,59 кн см =459 кг см;

Q0=0,45 кн.

*Проверка напряжений*

Напряжения в зоне нижнего узла резервуара.

Стенка. У=0.

σ1 =+- - - μ <=γcRy ;

γc=1,2 (в месте сопряжения)

Ry=23 кн/см.

N2=Py R=1995\*0,01518 =30,2841 кн/см ;

σ1= -(4,59\*6/(1,7^2))-2,758/1,7-0,3\*30,28/1,7 = -16,4953 < 1,2\*31,5 ;

σ2= + μ <=γcRy ;

σ2=30,28/1,7+0,3\*6\*4,59/(1,7^2)=20,671 < 1,2\*31,5 ;

τ ==0,45/1,7=0,265

 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

σпр=√σ12-σ1σ2+σ22+3 τ2 <=γcRy ;

σпр=32,25259 <31,5\*1,2=37,8 ;

Проверка выполнена.

Днище.

σ1=+- + <=γcRy ;

σ2=μ σ1;

 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

σпр= √ σ12-σ1σ2+σ2  <=γсRy ;

γc=1,2.

Вычислим изгибающий момент в днище справа от сечения х0 = mд с (считая от края днища).

Мд=[1+ϕ2(х0)] - ξ(x0)- [1-2θ(x0) ξ(x0)-ψ(x0) ϕ(x0)] = 1,473921 (кн см); тогда

σ1=4,821 <=1,2\*31,5=37,8 ;

σ2=0,3\*4,821=1,446;

σпр=4,20914

Проверка выполнена.

Расчет сферического купола.

Выполняем сферическую крышу в виде ребристого купола. Анализ различных конструктивных решений показал, что при симметричных нагрузках ребристый купол имеет меньшую массу и стоимость. При несимметричных нагрузках сетчатые и ребристо – кольцевые купола являются более надежными и жесткими конструкциями, чем ребристые, но не имеющими лучшие технико – экономические показатели.

Ребристый купол имеет основные конструктивные элементы: ребра – арки, наружное и внутреннее опорные кольца. Настил опирается на балочки и не является несущим элементом. Наружное кольцо мешает горизонтальным деформациям. Возникают горизонтальные реакции – распор. Стенка резервуара служит неподвижной опорой.

Ребро – арка может опираться на внутреннее кольцо двумя способами: шарнирное опирание и жесткое защемление. Если ребро приварить к внутреннему кольцу, то его можно считать как двухшарнирную арку с затяжкой. Роль затяжки играет внешнее кольцо, работающее на растяжение. Средний шарнир отсутствует.

Если ребра крепятся к внутреннему кольцу болтами, то ребро рассчитывается как трехшарнирная арка с упругой затяжкой.

Радиус кривизны Rк =(1,2 – 1,5)L;

Стрела подъема f0=(1/10 – 1/12)L=340 см;

Зная стрелу подъема, радиус кривизны определяется по формуле:

Rк= + =39,9^2/(8\*3,4)+3,4/2 =60,23 м;

Определим количество ребер в куполе:

n = m/2 =42/2 =21; m=π = 41,7831816 ≈ 42;

a=300 см;

Определим нагрузки.

q=q1+q2=0,018269+0,0094=0,027696

q1= γπ a =730\*1,05/(3,1415\*1995^2)\*298 = 0,018269 кн/см;

q2= γf2\*S0\*μ\*k1\*a=0,7\*0,5\*1\*0,315\*298=0,0094 кн/см;

1.Статический расчет арки.

Прежде всего определяем площадь условной затяжки:

FЗ= π =2\*3,1415926\*100/42 = 14,9599648≈15 см2;

Fи – площадь сечения опорного кольца.В реальных резервуарах колеблется в пределах от 90 до 120 см2. Предварительно принимаем Fи=100 см2.

m=2n; n – число арок в куполе.

А). Двухшарнирная арка.

V= =0,027696\*3990/4 =27,62676 кн.

Распор в арке:

Н=0,0456k=730\*1,05/(3,1415\*19956^2)\*298 =29,094699 кн;

К=0,492.

Определим расчетные усилия в различных сечениях арки:

х=L/2=1995 см; y=f0 =340 см; ά=0; сos ά=1; sin ά=0;

Mб=V\*x - =27,62\*1995-0,027696\*3990^2/12 =18358,3092 кнсм;

Ма=Мб – Н\*y=18358,3-29,09\*340 =8467,7 кнсм;

N= - (Qб sin ά +H сos ά) = - 29,09\*1= - 29,09 кн;

х= L/4=3990/4=998 см; y=f – Rи(1-cos ά)=254 см;

tg ά0= =3990/(2\*(6023-340))=0,3520 ; ά0=19,340 ; ά= ά0/2=9,670;

сos ά=0,9858; sin ά=0,168;

Мб= V\*x - qx - (q – qx) =27,62\*998-0,0138\*998^2/2-(0,027696-0,0138)\*998^2/3 =16078,841872 кнсм;

qx=q - q = 0,027696-0,027696\*2\*998/3990 =0,013841 кн/см;

Ма=Мб – Н\*y=16078,8-29,09\*254 =8689,94 кнсм;

N= - (Qб sin ά - H сos ά) =-(6,91\*0,168+29,09\*0,9858) =-29,8378 кн;

 Qб=V - x=27,62-998\*((0,027696+0,0138)/2) =6,913496 кн.

Проверка напряжений.

 Примем сечение ребра двутавр №27а; Wx=407 см3; А=43,2 см2; Ix=5500 cм4; х=L/4=998 см.

Прочность:

σ= - - =-8689,94/407-29,83/43,2 = -22,042 кн/см2 < 1\*24=24 кн/см2;

проверка прочности выполнена.

Устойчивость:

1,4\*Nx<= Nкр;

Nкр=πμ =3,14^2\*21000\*5500/(1,06\*((4094/2)^2)) = 256,3892 кн;

μ=1,06; S1=2 Rи ά0 = 2\*6030\*0,34=4094 см;

Nx= 1,4\*29,83=41,76 кн <Nкр= 256 кн.

Устойчивость обеспечена.

Б). Трехшарнирная арка.

V= =0,027696\*3990/4 =27,62676 кн.

Распор:

Н= =18371,895/340 =54,035

М0= =0,027696\*(3990^2)/24 =18371,7954 кнсм.

х= L/4=3990/4=998 см; y=f – Rи(1-cos ά)=254 см;

tg ά0= =3990/(2\*(6023-340))=0,3520 ; ά0=19,340 ; ά= ά0/2=9,670;

сos ά=0,9858; sin ά=0,168;

Мб= V\*x - qx - (q – qx) =27,62\*998-0,0138\*998^2/2-(0,027696-0,0138)\*998^2/3 =16078,841872 кнсм;

qx=q - q = 0,027696-0,027696\*2\*998/3990 =0,013841 кн/см;

Усилия в сечении х=L/4:

Ма=Мб – Н\*y=16078,8-54,035\*254 =2353,91 кнсм;

N= - (Qб sin ά - H сos ά) =-(6,91\*0,168+54,035\*0,9858) =-54,4286 кн;

 Qб=V - x=27,62-998\*((0,027696+0,0138)/2) =6,913496 кн.

Проверка напряжений.

Примем сечение ребра двутавр № 20а, Wx=203 см3; А=28,9 см3;Ix=2030 cм4.

Прочность:

σ= - - = 2353,91/203+54,428/28,9 =13,4789 < 24\*1=24 кн/см2;

Устойчивость:

1,4\*Nx<= Nкр;

Nкр=πμ =3,14^2\*21000\*2030/(1,2\*((4094/2)^2)) = 83,5906 кн;

μ=1,2; S1=2 Rи ά0 = 2\*6030\*0,34=4094 см;

Nx= 1,4\*54,428=76,199 кн <Nкр= 83,59 кн.

Устойчивость обеспечена.

Принимаем трехшарнирную арку.

Расчет опорного кольца арки.

Нижнее опорное кольцо расчитывается на два сочетания нагрузки:

собственный вес купола с коэффициентом надежности по нагрузке γf1=0,9 и внутреннее избыточное давление газа Ри=0,0002 кн/см2 с коэффициентом γf2=1,2; в этом случае опорное кольцо сжимается;

собственный вес крыши с коэффициентом γf1=1,1 и снеговой нагрузки с коэффициентом γf2=1,4 ; а также вакуум Рвак=0,000025 кн/см2 с коэффициентом γf3= 1,2. При таком сочетании опорное кольцо растягивается.

Первое сочетание:

q=q’+q”=0,01566-0,07152= -0,05586 кн/см;

q’= γπ a=730\*0,9/(3,1415\*1995^2)\*298 =0,01566 кн/см;

q”= - P0 γf2 a =-0,00024\*298 =-0,07152 кн/см;

a=π=298 см;

m=2 n=42;

Втрое сочетание.

q=q1+q2 =730\*1,05/(3,1415\*1995^2)\*298+0,7\*0,5\*0,8\*1/10000\*298 =0,026613 кн/см;

Вычислим изгибающие моменты и осевые усилия.

Распор.

Двухшарнирная арка:

Н=0,0456 k (кн);

k=0,492.

Трехшарнирная арка:

 Н=

М0=

Вертикальная реакция.

V= (кн);

Усилие в кольце равно:

Nk=π (кн);

От действия сосредоточенных усилий распор «Н» в кольце возникают изгибающие моменты в плоскости кольца:

Мк= [ - ] (кнсм);

Здесь α=2 π/m – угол между ребрами в радианах; β – величина угла в пределах от 0 до α;

М0 – изгибающий момент в сечении, где опираются ребра (β=0; α=2\*π/42=0,1495);

Мпр – изгибающий момент в сечении между арками (β= α/2; α/2=0,0748 рад).

Результаты вычислений приведены в таблице № 12.

Таблица № 12.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Расчетная схема | Первое сочетание нагрузок | Второе сочетание нагрузок |
|  |  | Н | Nк | Mо | Mпр | Н | Nк | Mо | Mпр |
| 2-хшарнирная арка | -58,681 | -392,254 | -1454,38 | 733,9951 | 27,94335 | 1843,519 | 692,5619 | -349,521 |
| 3-хшарнирная арка | -108,982 | -728,494 | -2701,08 | 1363,176 | 51,8964 | 3423,785 | 1286,226 | -649,132 |

Проверка прочности и устойчивости нижнего опорного кольца.

Примем следующее сечение кольца:

Геометрические характеристики сечения:

Площадь А=30,6+40\*1+80\*1+30\*25=225,6 см2;

ус= =39,4 см;

Iy=208+30,6(80-2,4-39,4)2 +40\*1(80+ - 39,4)2 +30\*2,5\*39,42 + +80\*1( - 39,4)2 =659377 см4;

Wy1= =16240 см3; Wy2= =15388 см3 .

Прочность кольца.

Проверка производится по формуле:

σк= + <=γcRy ; γc=0,9;

Nк – усилие от действия второго сочетания нагрузок;

Mmax – максимальный изгибающий момент из М0 и Мпр;

Wy min – минимальный момент сопротивления из двух Wy1 и Wy2 .

Двухшарнирная арка.

σк=1843,519/225,6 + 692,56/15388=8,22 кн/см2 <23\*0,9=20,7 кн/см2;

Проверка выполнена.

Трехшарнирная арка.

σк=3423,78/225,6 + 1286,2/15388 =15,26 кн/см2<20,7 кн/см2.

Проверка выполнена.

Устойчивость кольца.

Расчет ведется по первому сочетанию нагрузок (в случае, если величина Nк отрицательная величина).

σк= - - <=σcrγc ; γc=0,9;

σcr= (кн/см2) ; Е=2,1\*104.

Двухшарнирная арка.

σcr=3\*21000\*659377/19953 = 5,23 кн/см2 ;

σк= - 392,25/225,6 – 1454,38/15388 = 2,68 кн/см2<5,23 кн/см2;

Устойчивость обеспечена.

Трехшарнирная арка.

σк= - 728,49/225,6 – 2701,08/15388 =3,4 кн/см2<5,23 кн/см2;

Устойчивость обеспечена.

Расчет промежуточного кольца жесткости.

Промежуточные кольца жесткости устанавливаются на корпусе для обеспечения устойчивости стенки.

Расчет кольца на суммарное давление ветра и вакуума.

В данном случае кольцо работает на сжатие и его следует проверить на устойчивость по формуле:

Р0 <= ; где

Р0 = Рвак \*1,2 + 1,4\*w0\*0,5\*C=0,000025\*1,2+1,4\*(0,3/10000)\*0,5\*1 =0,000051 кн/см2;

Рвак=0,000025 кн/см2 ; w0 =0,3 кн/м2 – скоростной напор ветра в районе Днепропетровска.

С=1;

 y0=894 cм – ширина оболочки, с которой передается ветровая нагрузка на кольцо.

Iy – момент инерции сечения ребра отнсительно оси проходящей через центр тяжести сечения.

Iy= Iугол+Fугол\*а2+F - \*(x – y)2 39,53+7,39\*4,79^2 + 30\*4,79^2= 897,41 см4;

S11=Fугол\*x =7,39\*5,98=44,192 см3;

х=75-z0+tст/2 =7,5-2,02+0,5 =5,98 см ;

у= S11/F = 44,192/37,39=1,181 см;

Проверка :

Р0 =0,0000051 кн/см2< = 0,00000796 кн/см2.

Проверка выполнена.

Радиальный момент в стенке в месте промежуточного ребра.

Mк= = 4,66493056 ;

mcт=( )^(1/4) = 0,0288;

Р=γ =0,537410341 ;

σ1 = = 18,64 < 23\*1 кн/см2;

Напряжение σ2 (в кольце и стенке)

σ2= =9,4220785 кн/см2 < 23\*1 кн/см2;

S=0,6(R\*tст)^(1/2) = 26,8 ;

Проверка выполнена.

Сравнение вариантов.

*Стенка.*

Для выбора варианта сравним массы стенок.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Тип стенки | Толщины поясов | Масса стенки, т | Относительная масса,% |
| 1 | Однослойная из стали С 255 | 25+18+17+16+14+12+11+5\*10 |  238,98 | 100 % |
| 2 | Однослойная из стали С 345 | 17+2\*14+12+11+7\*10 |  202,33 | 84,664 % |
| 3 | Однослойная комбинированная (С 255/С 345) | 17+2\*14+12+11+7\*10 |  202,33 | 84,644 % |
| 4 | Двухслойная стенка (С 255) | 12/6+11/6+3\*10/6+7\*10 |  224,32 | 93,8656 % |
| 5 | Преднапряженная стенка | 16+2\*14+3\*12+11+5\*10 |  206,73 | 86,5051 % |

Как видно из таблицы, наиболее выгодными являются 2 и 3 варианты, но 2 вариант дороже из-за того, что стенка изготовлена полностью из стали С 345, поэтому принимаем 3 вариант – однослойную комбинированную стенку из сталей С 345 и С 255.

*Крыша.*

Сравним массы ребер купола:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Расчетная схема | Сечение ребра | Масса ребер, т | Относительная масса , % |
| 3-хшарнирная арка. | Двутавр № 20а. | 38,04 | 66,96 % |
| 2-хшарнирная арка . | Двутавр № 27а. | 56,81 | 100 % |

Принимаем сечение ребра - двутавр № 20а.

*Определение максимальной нагрузки «р=γ Н», при которой будет достигнуто предельное состояние в зоне «нижнего узла».*

В зоне «нижнего узла» напряженное состояние определяется изгибающим моментом «М1» (вдоль образующей), N2 - кольцевое растягивающее усилие, N1 – меридиональное сжимающее усилие.

Момент «М1» определяется методом сил по общеизвестной методике, соответственно следующей расчетной схеме:

N2 =γ\*y\*r

N1=p\*r/2

Для резервуара V=20000 м3 (при Н=1788 см, tc=1,6 см,r=1995 см,р=1,54 кг/см2)

M1=459 кгсм; Q1=0,45 кн.

Если предположить, что стенка жестко защемлена (нет ни угла поворота, нисмещения вдоль днища), то

 М1=(1-βy) =1555 кгсм;

β==0,02275;

μ=0,3; r=1995; tc=1,6; p=1,54.

Q=(2β - 1/H) = 69,8 кг/см;

Напряжение в нижней части стенки

σ1= - -=2067<3780;

σт=3300 ст.09Г2С-12

Чтобы σ1=σт (на краю) надо приложить нагрузку

Рпр=р\*к=1,61\*3300/σ1=2,81 кн/см.

Однако, теоретически, несущая способность стенки не исчерпаема.Она будет исчерпана, когда σ=σт по всему сечению,т.е. будет иметь место пластический шарнир:

Причем этому предельному состоянию будет соответствовать предельный момент:

Мт=3300\*1,6^2/4=2112 кгсм.

На расстоянии «S» от края будет иметь место максимальное усилие:

N2=3300\*1.6=5280кн/см;

qпр=5280/1995=2,628 кг/см2.

Рассмотрим несколько предельных состояний :

В реальном резервуаре «предельное состояние» находится между 1 и 2. Если бы были известны S, P, и Q, то мы знали бы «точно» 1 и 2 предельнные состояния.

При расчете использована методика, изложенная в книге « Листовые конструкции». Приняты следующие допущения:

N2т и М1т – не зависят друг от друга;

Вместо реальной диаграммы принята диаграмма Прандля.

N2т=σт\*t; M1т=σт\*t2/4; qпр= N2т/r.

Для каждой из схем 1 и 2 рассмотрим условие:

Первая схема.

1. ∑Ма=0; М1т -  +  = 0;

2. ∑х =0; +Q – pS = 0;

3. ∑Δ=0; δQ\*Q - δp\*P - δм\*М1т=0.

Вторая схема.

1. 2\*М1т -  +  = 0;

2. +Q – pS = 0;

3. δQ\*Q - δp\*P - δм\*М1т=0.

Эти системы позволяют найти «р», «S» и «Q».

1 схема: р=4,17 кг/см2; Q=125кг; S=44 см.

2 схема: р=16,7 кг/см2; Q=355,8 кг; S=23,1 см.

В обеих схемах М1т 2112 кгсм.

Тогда в реальном резервуаре:

S=39,5 см; р=10,5 кг/см2; Q=240 кг; М1т=2112 кгсм.

Таким образом, если не учитывать опасность хрупкого разрушения, опасность малоцикловой усталости, то можно считать, что теоретический коэффициент запаса равен:

Кз= ;

Какой коэффициент запаса на самом деле с учетом вышеуказанных факторов пока сказать нельзя.