**Стальной вертикальный цилиндрический резервуар емкостью 5000 м3**

Республика Беларусь

Научно-проектное республиканское унитарное предприятие «ИнТест»

Минск 2002

**Предисловие**

Нормативные документы периода разработки типового проекта «Стальной вертикальный цилиндрический резервуар емкостью 5000 м3» отражали уровень научно-технических знаний того времени и, естественно, не могли учитывать достижений науки и практики последующих лет, отраженных в строительных нормах и правилах периода возведения сооружения.

Учет особенностей работы конструкций при выборе расчетной схемы является весьма ответственной задачей. Как правило, более точной расчетной схеме соответствуют более сложные расчеты, упрощение которых может явится одной из причин появления ошибок. Принятие неадекватной расчетной схемы, а также несовершенство нормативных документов периода проектирования потребовало проведения анализа напряженно-деформированного состояния резервуара в целом и его конструктивных элементов в отдельности с использованием современных компьютерных технологий и систем, что обеспечит высокую эксплуатационную надежность сооружения.

**1. Исходные данные и конструктивные решения резервуара, основные расчетные положения**

Плотность жидкости ρ = 900 кг/м3. Место строительства — II район по снеговому покрову, нормативная нагрузка s0 = 0,7 кПа. Материал резервуара — сталь С245 с Ry = 240 МПа; сварка листов автоматическая проволокой Св-08Г2С. Избыточное давление паров испаряющейся жидкости Pи = 2 кПа, а вакуум — 0,25 кПа. Коэффициент надежности по назначению γn = 1.

Номинальные размеры резервуара Н = 12 м и D = 23 м; в типовом резервуаре объемом 5000 м3 конструктивные размеры по высоте Н = 11920 мм, внутренний диаметр Do = 22800 мм и наружный диаметр D = 22818 мм (укладывается по длине окружности 12 листов длиной по 6 м).

Крыша резервуара запроектирована в виде щитов, состоящих из листов толщиной t = 2,5 мм, уложенных на каркасе из двутавров, швеллеров и уголков. Щиты опираются на центровую трубчатую стойку и корпус резервуара.

Днище, расположенное на песчаном основании, испытывает только сжатие от давления жидкости, поэтому толщина его листов назначена по конструктивным соображениям t = 5 мм. Диаметр днища Dв = D + 90 мм = 22818 + 90 = 22908 мм (выступ днища за пределы стенки принят 50 мм. Максимальная высота налива продукта 11,3м.

Несущие конструкции резервуара рассчитывают по предельным состояниям в соответствии со строительными нормами и правилами [1], [3], с учетом дополнительных требований [2]. В соответствии с ними конструкции резервуара емкостью менее 10 тыс. м3 относятся ко II классу ответственности.

Стенка резервуара, являясь оболочкой вращения, при действии асимметричной нагрузки находится в безмоментном состоянии, и только в зонах краевого эффекта (в месте сопряжения стенок с днищем) имеет место моментное напряженное состояние.

Под воздействием внутреннего давления Р в тонкостенной оболочке возникают кольцевые и меридиональные напряжения Б1 и Б2.

Основной нагрузкой для стенки вертикального цилиндрического резервуара является внутреннее давление Р как сумма гидростатического давления паровоздушной среды (рис. ).

При пустом резервуаре возможен отрыв корпуса резервуара от основания под действием внутреннего избыточного давления и ветрового воздействия. Для предупреждения отрыва по периметру резервуара предусмотрена постановка анкерных устройств.

Вертикальный цилиндрический резервуар низкого давления имеет коническую щитовую кровлю. Щитовую коническую кровлю применяют в резервуарах низкого давления с внутренним избыточным давлением в газовой подушке до 200 мм водного столба (2 кПа) и вакуум до 25 мм вод. ст. (0,25 МПа).

Коническая крыша состоит из жестких щитов, покрытых стальной оболочкой и опирающихся на центральную стойку с кольцом, а по периметру — на стенку корпуса. Каркас щитов выполнен из двутавра 30, швеллеров 8 и 6,5 и уголков 90х56х5,5. Листы кровли толщиной t = 2,5 мм крепятся на каркас щита с напуском с одной стороны на ширину нахлестки.

При расчете стационарной крыши резервуара учитываются две комбинации нагрузок:

1) расчетные нагрузки, действующие на покрытие сверху вниз;

2). расчетные нагрузки, действующие на покрытие снизу вверх: внутреннее избыточное давление в паровоздушной сфере.

При расчете конической кровли несущие радиальные балки щитов рассматривают как элементы, работающие на изгиб. Поперечные ребра щитов рассчитаны по схеме простых балок, опирающихся на средние радиальные балки.

**2. Определение расчетных нагрузок**

**Гидростатическое давление**

Высота уровня залива резервуара Н0 = 11,3 м, а с учетом избыточного давления Р0 = 2 кПа условная высота Н = Н0 + Р0/ρ = 11,3 + 2/9 = 11,5 м. Расчетная схема стенки резервуара показана на рис. 2.1. По высоте резервуара стенка состоит из восьми поясов высотой по 1500 мм. Расчетное сечение каждого пояса расположено на высоте 300 мм выше его нижней кромки, т.е. в сечении, где не учитывается влияние кольцевых швов смежного пояса.

Пояс стенки резервуара из условия обеспечения прочности (по первой группе предельных состояний) рассчитывается на гидростатическое давление, определяемое по формуле:



где — коэффициент надежности по нагрузке для гидростатического давления, равный 1,1.



Определение давления на пояса стенки сведено в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Гидростатическое давление на стенку резервуара

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  пояса | Расстояние от верха  резервуара | | Значения (х1-620)  до расчетного уровня жидкости, мм | Внутреннее давление на пояс ,  кПа | Толщина листов пояса t, мм |
| до низа пояса | до расчетного  уровня х1 |
| 8 | 1490 | 1190 | 570 | 5,643 | 6 |
| 7 | 2980 | 2680 | 2060 | 20,394 | 6 |
| 6 | 4470 | 4170 | 3550 | 35,145 | 6 |
| 5 | 5960 | 5660 | 4740 | 46,926 | 6 |
| 4 | 7450 | 7150 | 6530 | 64,647 | 6 |
| 3 | 8940 | 8640 | 8020 | 79,398 | 7 |
| 2 | 10430 | 10130 | 9510 | 94,149 | 8 |
| 1 | 11920 | 11620 | 11000 | 108,900 | 9 |

**Внутреннее избыточное давление паровоздушной среды**



где — коэффициент надежности по нагрузке для внутреннего избыточного давления.



**Снеговая нагрузка**

Расчетная снеговая нагрузка на покрытие



где S0 — нормативное значение веса снегового покрова на 1 м2 горизонтальной поверхности земли (табл. 4 [2]);

γf = 1,6 т.к. отношение постоянной нагрузки к временной qn/pn < 0,8 (п. 5.7 [2]).

**Вакуум**

Стенка незаполненного резервуара может потерять устойчивость под воздействием вертикальной нагрузки (веса кровли, снега, вакуума Pv, собственного веса вышележащей части стенки) и равномерного давления нормального к боковой поверхности, создающего сжимающие усилия в кольцевом направлении (вакуум Pv).

Расчетная нагрузка от вакуума



**3. Определение усилий в элементах резервуара**

Статический расчет резервуара выполнен по программе «Лира–Windows» вер. 8.0. Разбиваем стенку резервуара на конечные элементы по вертикали n1 = 8 (по числу поясов), по окружности n2 = 24 (по числу радиальных балок покрытия). Кровлю и днище разбиваем соответственно на n1 = 9 и n2 = 24 конечные элементы. Разбивка резервуара на конечные элементы приведена на рис. 3.1.

Расчет резервуара выполнен на 5 загружений:

1 загружение — постоянная нагрузка от собственного веса конструкций (учитывается автоматически);

2 загружение — гидростатическое давление;

3загружение — избыточное давление паровоздушной среды;

4 загружение — снег;

5 загружение — вакуум.

Результаты статического расчета приведены в приложении 2 (пластины) и 3 (стержни). В таблицах приложения приведены усилия от каждого загружения, а также расчетные сочетания усилий в элементах. Поскольку данная расчетная схема и нагрузки являются центрально симметричными на печать выведены усилия на элементы только одного сегмента.

**4. Расчет элементов резервуара**

**4.1. Расчет стенки резервуара на прочность**

Расчет на прочность стенки резервуара, находящейся в безмоментном напряженном состоянии, выполнена по формуле



где σx  и σy — нормальные напряжения в кольцевом и меридиональном направлениях;

γс — коэффициент условий работы, равный для нижнего пояса — 0,7, для остальных поясов — 0,8;

Так как расчетное сопротивление сварного шва встык растяжению для конструкций из стали С245 при автоматической, полуавтоматической и ручной сварке с физическим контролем качества шва Rwy = Ry = 240 МПа (табл. 51\* [3]) расчет производим по материалу стенки резервуара.

Расчетные напряжения принимаем из таблицы сочетаний по приложению 2.

Первый пояс (элемент 877)



Второй пояс (элемент 901)



Третий пояс (элемент 925)



Пояс 4 (элемент 949)



Аналогично выполнен расчет и других поясов. Расчет поясов стенки сведен в таблицу.

Таблица 4.1 Расчет поясов стенки резервуара

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер пояса | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Напряжения в поясе σ, МПа | 81,3 | 159,2 | 143 | 116 | 89,6 | 65,3 | 40,4 | 15,2 |

Проверяем напряжения в нижнем поясе стенки резервуара с учетом действия краевого момента Мк. Изгибающий момент в месте сопряжения корпуса с плоским днищем при упругом защемлении стенки определяем по формуле



где Р — внутреннее давление в месте сопряжения корпуса с днищем



**4.2. Расчет конструктивных элементов щитов покрытия**

Расчет конструкций покрытия производим на два вида нагрузок: Нагрузка, направленная внутрь резервуара — собственный вес и вакуум, снег; нагрузки, направленные наружу — избыточное давление.

Нагрузки, действующие сверху вниз, кПа

|  |  |
| --- | --- |
| постоянная |  |
| листовой настил t = 2,5 мм | 78,5∙0,0025∙1,05 = 0,206 |
| балки (осредненно) | 0,15∙1,05 = 0,157 |
| вакуум (разрежение) | 0,25∙1,15 = 0,288 |
|  | Итого g = 0,65 |
| временная снеговая | Ps = 1,12 |
|  | Всего g + Ps = 1,77 |

Расчет настила

Предельный относительный прогиб настила fu/l = 1/150 = 1/no [3].

Из условия заданного предельного прогиба определяем отношение наибольшего пролета настила к его толщине l/t по формуле, предложенной А.Л. Телояном (8.5 [5]).



где — цилиндрическая жидкость;



При t = 2,5 мм пролет настила допустим l ≤1037∙2,5 = 2592 мм.

По конструктивным соображениям расстояние между ребрами принято 1,25 м.

**Расчет поперечных ребер щита**

Максимальный расчетный пролет ребра принят l = 2,67 м; равномерно распределенная нагрузка при шаге поперечных ребер b = 1,25 м составит:



Изгибающий момент, как в свободно опертой балке,



Требуемый момент сопротивления сечения составляет



По сортаменту принят [ 8, Wx = 22,4 см3, Jx = 89,4 см4

Относительный прогиб ребра составляет



где qn = 1,296∙1,25 = 1,62 кН/м

Ребро пролетом l = 2,01 м



По сортаменту принят швеллер 6,5 , Wx = 15 см3.

Все остальные ребра с пролетом меньше 2 м также приняты из [ 6,5.

**Расчет продольной балки щита**

Пролет балки при свободном опирании на стенку резервуара и оголовок (зонт) трубчатой стойки равен 10 м. Сечение балки I 30 (А = 46,5 см2, Wx =472 см3).С учетом упругого защемления на опорах максимальный изгибающий момент от вертикальных нагрузок составляет М = 27,11 кНм при осевой растягивающей силе N = 10,07 кН (элемент 73).

Напряжения в балке проверяем как во внецентренно-растянутом элементе по формуле



Расчет элементов покрытия на вторую комбинацию нагрузок (избыточное давление изнутри резервуара наружу) производим на комбинацию усилий М = – 34,54 кНм и N = 50,96 кН.



Максимальный прогиб продольной балки от нормативных нагрузок составляет (см. приложение 1)



что меньше предельного прогиба



Повышенная несущая способность продольной балки щита покрытия объясняется учетом пространственной работы системы с включением в работу настила.

**4.3. Расчет центральной стойки**

Расчет центральной стойки (элемент 1019) производим на центрально приложенную осевую силу.

По конструктивным соображениям, с учетом опирания щитов покрытия и использования стойки для рулонирования элементов резервуара принята стойка из труб диаметром 426 мм со стенкой толщиной 7 мм по ГОСТ 10704–91, А = 92,1 см2, радиус инерции сечения i =14,8 см, сталь ст20сп по ГОСТ 8731-87, Ry =225 МПа (табл. 51,а [4]).

Гибкость стойки По таблице 16.2 [4] находим φ =0,689.



Предельное усилие, которое может воспринять стойка при сжатии осевой силой



что значительно больше расчетного усилия (см. приложение 2, элемент 1020).

Оголовок (зонт) и база стойки запроектированы одинакового диаметра 2660 мм с расчетом возможности ее использования для рулонирования стеки или отправочной части днища резервуара на заводе-изготовителе.

**4.4. Проверка устойчивости положения покрытия при действии избыточ**ного давления **Ро = 2 кПа.**

Общий вес покрытия и стойки без учета временной нагрузки составляет 247,5 кН (лист 4 [6]).

Усилие изнутри резервуара вверх при Ро = 2 кПа составит



Так как Ne = 940 кН > N = 247,5 кН проектом предусмотрено крепление щитов покрытия к каркасу и стойке резервуара. Окаймляющие щиты уголки привариваются к каркасу угловыми швами с катетом Кf = 6 мм, а к оголовку (зонту) стойки каждый щит закрепляется временным болтом М16 с последующей приваркой его к кольцу стойки. Обшивки смежных щитов покрытия соединяются на монтаже по всей длине угловыми швами Кf = 25 мм.

Общая нагрузка от веса резервуара без учета нагрузки от веса днища Jc = 722,8 кН (лист 4 [4]).

Усилие, отрывающее корпус от днища



Проверяем напряжения в швах, прикрепляющих нижний пояс стенки к днищу, при действии усилия отрыва



где



Rwf — расчетное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу шва (табл. 56 [2]);

βf = 0,7 — коэффициент для ручной сварки, принимаемый по табл. 34\* [2].

Стойка приваривается к днищу по контуру опорного кольца.

Пригрузка стойки производится путем обетонирования ее по контуру опорного ребра на высоту 1,5 м. Объем бетона 8,3 м3, вес пригруза 19,3 т.

4.5. Проверка устойчивости корпуса резервуара при совместном действии вертикальных и горизонтальных (боковых) сжимающих усилий выполняем согласно рекомендациям п. 8.5 … 8.9 [3] по формуле



где σ1 и σ2 — соответственно абсолютные значения расчетных продольных и кольцевого сжимающих напряжений;

σcr1 и σcr2 — соответственно критические напряжения при раздельном равномерном действии осевого и радиального сжатия;

γс = 1.

Проверяем устойчивость формы резервуара для четвертого пояса, где t = 6 мм.

Продольное и кольцевое сжимающие напряжения в элементе 949 (приложение 2) от постоянной, снеговой нагрузок и вакуума (загружения 1, 4, 5) соответственно равны σ1 = 1,41 МПа и σ2 = 0,5 МПа.

Определяем критические напряжения по пп. 8.5 и 8.7 [3].При равномерном сжатии вдоль образующей цилиндрической оболочки σcr1 принимается равной меньшей из величин.



где ψ, с — коэффициенты, принимаемые по п. 8.5 [3].

При r/t = 1140/0,6 = 1900 > 300 коэффициент ψ не учитывается, а коэффициент

с = 0,066 (по интерполяции).

Тогда



При Н/r = 12/11,4 = 1,05 σcr2 определяем по формуле



Проверяем устойчивость по формуле



т.е. устойчивость корпуса обеспечена.

5. Указания по изготовлению и монтажу резервуара

Конструктивные элементы резервуара (днище, стенку, щиты покрытия, стойку и шахтную лестницу) изготовляют на заводе и доставляют на место строительства в виде укрупненных элементов.

Днище сваривают из полос и разбивают на два элемента — половины днища. Стенку также сваривают из ранее подготовленных полос, а затем сворачивают на стенде в рулон вокруг стойки или шахтной лестницы и в таком виде доставляют на стройку. Аналогично доставляют и половины днища, которые соединяют затем внахлестку. После монтажа днища в центре устанавливают вертикально рулоны корпуса и с помощью специального устройства разворачивают до заданного диаметра. Монтажный стык корпуса выполняют равнопрочным основному металлу. Щиты покрытия укладывают на зонт стойки и стенку резервуара по мере разворачивания рулона корпуса. Для фиксирования положения на внешней стороне щитов предусматривают ловители из полосовой стали. После приварки стенки к днищу и устройства всех монтажных швов корпуса проверяют качество сварки физическими или химическими способами, обеспечивая непроницаемость соединений.

**Список литературы**

1. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. — 36 с.

2. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия. (Дополнения. Раздел 10. Прогибы и перемещения)/Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. — 8 с.

3. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990 — 96 с.

4. Металлические конструкции. В 3 т. Т 1. Общая часть (справочник проектировщика)/ Под общей ред. В.В. Кузнецова)(ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова) — М.: издательство АСВ, 1988, 576 с.

5. Металлические конструкции. В 3 т. Т 1. Элементы стальных конструкций. Учебн. для строит. вузов/под ред. В.В. Гареева. — М.: Высш. шк.., 1997. — 527 с.

6. Стальной вертикальный цилиндрический резервуар для нефти и нефтепродуктов емкостью 5000 м3. Альбом 1. Типовой проект 704–1–57. (Корректировка 2000 г.).