

Федорова Алина Владимировна, Студент,
Санкт-Петербургский Горный Университет императрицы Екатерины II
Fedorova Alina Vladimirovna,
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II

**РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ,
ПРОЧНОСТИ, УСТОЙЧИВОСТИ И НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕНКЕ РЕЗЕРВУАРОВ
CALCULATION OF STRESS-DEFORMED STATE, STRENGTH,
STABILITY, AND TENSIONS IN THE WALL OF RESERVOIRS**

Аннотация. В статье представлен расчет кольцевых и продольных напряжений в стенках стальных резервуаров объемом 1000 м³ и 2000 м³. Выполнен поверочный расчет на прочность и устойчивость для восьми поясов каждого резервуара с учетом эксплуатационных нагрузок.

Abstract. The article presents the calculation of hoop and longitudinal stresses in the walls of steel tanks with a volume of 1000 m³ and 2000 m³. Verification calculations for strength and stability were performed for eight courses of each tank, taking into account operational loads.

Ключевые слова: Резервуар, напряженно-деформированное состояние, кольцевые напряжения, продольные напряжения, прочность, устойчивость.

Keywords: Tank, stress-strain state, hoop stresses, longitudinal stresses, strength, stability.

Исходные данные для проведения расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Характеристики резервуара и нагрузки	Значения первого вида резервуара	Значения второго вида резервуара
Объем, м ³	2000	1000
Внутренний диаметр стенки, мм	15180	10430
Высота стенки, мм	12000	12000
Количество поясов, шт.	8	8
Толщина верхнего пояса стенки, мм	5	5
Толщина нижнего пояса стенки, мм	6	6
Толщина центральной части днища, мм	5	5
Толщина окраек днища, мм	6	
Толщина настила крыши, мм	4	6
Масса стенки, кг	25581	16410
Масса днища, кг	8205	3584
Масса крыши, кг	12380	5379
Масса лестницы, кг	1200	1200
Масса площадки на крыше, кг	2257	1737
Масса комплектующих конструкций, кг	1772	1772



Масса люков и патрубков, кг	1077	951
Масса каркасов и упаковок, кг	3000	1700
Снеговая нагрузка, Па	1400	1000
Избыточное давление газов, Па	1950	1900
Высота налива продукта при эксплуатации, мм	10800	10800

Кольцевые напряжения, МПа, вычисляются для нижней точки каждого пояса по формуле:

$$\sigma_{ki} = \frac{(0,001\rho g (H-x_L)+1,2p) \cdot r}{t_{ir}}, \quad (1)$$

ρ_g – плотность хранимого продукта, т/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; t_{ir} – расчетная толщина i пояса стенки, м; p – избыточное давление в газовом пространстве, МПа; H – высота налива продукта при эксплуатации, м; x_L – расстояние от дна до рассматриваемой точки i -го пояса, м; r – радиус срединной поверхности стенки резервуара, м.

Продольные напряжения, МПа, в i -м поясе стенки резервуара определяются по формуле:

$$\sigma_{pri} = \frac{1,05 \cdot G_m + 1,05 \cdot \psi_1 \cdot G_0 + 1,3 \cdot \psi_2 \cdot G_t}{2\pi \cdot r \cdot t_{ir}}, \quad (2)$$

где G_m – вес металлоконструкций выше расчетной точки, МН; G_0 – вес стационарного оборудования на кровле резервуара, МН; G_t – вес теплоизоляции выше расчетной точки, МН; ψ_1, ψ_2, ψ_3 – коэффициенты сочетаний для длительных нагрузок, для основной по степени влияния нагрузки $\psi_1 = 1$, для остальных $\psi_2 = 0,95$.

Пример расчет кольцевых и продольных напряжений для первого пояса резервуара РВС – 2000 по формулам (1) – (2), при этом не учитывается вес теплоизоляции:

$$\sigma_{k1} = \frac{(0,001 \cdot 873 \cdot 9,81 \cdot (6-0) + 1,2 \cdot 1950) \cdot \left(\frac{15,18}{2}\right)}{0,006} = 119,96 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{pr1} = \frac{1,05 \cdot 0,25 + 1,05 \cdot 1 \cdot (12380 + 2257) \cdot 9,81 \cdot 10^{-6} + 0}{2 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{15,18}{2}\right) \cdot 0,006} = 1,45 \text{ МПа},$$

В таблицах 2 и 3 представлены результаты расчета кольцевых и продольных напряжения в каждом поясе для обоих типов резервуаров.

Таблица 2

Расчет кольцевых и продольных напряжений для резервуара объемом 2000 м³

Расчетная толщина I пояса стенки, мм	Расстояние от дна до рассматриваемой точки, мм	Кольцевые напряжения, МПа	Вес металлоконструкции выше расчетной точки, МН	Продольные напряжения, МПа
6,00	0	119,96	0,25	1,45
5,86	1500	106,24	0,22	1,37
5,71	3000	91,84	0,19	1,28
5,57	4500	76,69	0,16	1,19
5,43	6000	60,75	0,13	1,09
5,29	7500	43,94	0,09	0,99
5,14	9000	26,20	0,06	0,88
5,00	10500	7,45	0,03	0,77



Таблица 3

Расчет кольцевых и продольных напряжений для резервуара объемом 1000 м³

Расчетная толщина I пояса стенки, мм	Расстояние от дна до рассматриваемой точки, мм	Кольцевые напряжения, МПа	Вес металлоконструкции выше расчетной точки, МН	Продольные напряжения, Мпа
6,00	0	82,37	0,16	1,23
5,86	1500	72,94	0,14	1,15
5,71	3000	63,04	0,12	1,07
5,57	4500	52,64	0,10	0,98
5,43	6000	41,68	0,08	0,89
5,29	7500	30,13	0,06	0,79
5,14	9000	17,94	0,04	0,69
5,00	10500	5,06	0,02	0,58

Следует отметить, что наибольшие значения напряжений приходятся на нижние пояса резервуара, кроме того «скачок» напряжений имеется в восьмых поясах в связи с тем, что его толщина меньше значения толщин вышележащих поясов.

Поверочный расчет на прочность

Поверочный расчет на прочность для каждого пояса стенки резервуара согласно следует проводить по соотношению:

$$(\sigma_{\text{пр}i}^2 - \sigma_{\text{пр}i} \cdot \sigma_{\text{к}i} + \sigma_{\text{к}i}^2)^{0,5} \leq R, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{пр}i}$ – продольное напряжение в i-ом поясе резервуара, МПа; $\sigma_{\text{к}i}$ – кольцевое напряжение в i-ом поясе резервуара, МПа; R – расчетный параметр, МПа, рекомендуется определять по формуле:

$$R = \frac{R_{\text{yn}} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_t}{\gamma_m \cdot \gamma_n}, \quad (2)$$

где R_{yn} – нормативное сопротивление, принимаемое равным гарантированному значению предела текучести по действующим стандартам и техническим условиям на сталь; γ_n – коэффициент надежности по опасности, безразмерный коэффициент; γ_m – коэффициент надежности по материалу, безразмерный коэффициент; γ_c – коэффициент условий работы поясов стенки, безразмерный коэффициент; γ_t – температурный коэффициент.

Коэффициент надежности по опасности γ_n для резервуара IV класса опасности принимаем равный 1 согласно.

Значение коэффициента надежности по материалу γ_m принимаем 1,05 по [4].

Значения коэффициентов условий работы γ_c поясов стенки в условиях эксплуатации равняются [4]:

- для первого пояса – 0,7
- для всех поясов, кроме первого – 0,8.

Для условий эксплуатации резервуара РВС – 2000 при температуре ± 40 °С значение температурного коэффициента принимаем $\gamma_t = 1$ [3].

Определяем значение расчетного параметра R по формуле (2):

Для РВС – 2000:

- для первого пояса:

$$R_1 = \frac{245 \cdot 0,7 \cdot 1}{1,05 \cdot 1,05} = 156 \text{ МПа},$$

- для всех поясов, кроме первого:



$$R_{2-8} = \frac{245 \cdot 0,8 \cdot 1}{1,05 \cdot 1,05} = 178 \text{ МПа,}$$

Для РВС – 2000:

– для первого пояса:

$$R_1 = \frac{245 \cdot 0,7 \cdot 1}{1,05 \cdot 1,05} = 156 \text{ МПа,}$$

– для всех поясов, кроме первого:

$$R_{2-5} = \frac{245 \cdot 0,8 \cdot 1}{1,05 \cdot 1,05} = 178 \text{ МПа,}$$

По формуле (1) для первого пояса резервуара выполняем расчет левой части соотношения:

$$(1,45^2 - 1,45 \cdot 119,96 + 119,96^2)^{0,5} = 119,25 \text{ МПа,}$$

Проверяем выполнение соотношения (1) для первого пояса резервуара:

$$119,25 \leq 156,$$

следовательно, условие прочности выполняется.

Результаты расчетов для остальных поясов обоих видов резервуаров представлены в таблице 4.

Таблица 4

Поверочный расчет

Номер пояса	Поверочный расчет	
	2000 м ³	1000 м ³
1	119,25	81,76
2	105,57	72,38
3	91,20	62,52
4	76,10	52,15
5	60,21	41,24
6	43,46	29,75
7	25,77	17,61
8	7,10	4,80

Как видно из таблицы 4, условие прочности (1) выполняется для всех поясов стенки обоих резервуаров.

Расчет стенки на устойчивость

Устойчивость стенки резервуара обеспечена при выполнении следующего условия:

$$\frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{пркр}} + \frac{\sigma_{к}}{\sigma_{ккр}} \leq 1, \quad (1)$$

где $\sigma_{пркр}$ – критические продольные напряжения, МПа, определяются по формуле:

$$\sigma_{пркр} = C_0 \frac{E}{\delta}, \quad (2)$$

$\sigma_{ккр}$ – критические кольцевые напряжения, МПа, определяются по формуле:

$$\sigma_{ккр} = 0,55 \frac{r}{H_r} \frac{E}{\sqrt{\delta^3}}, \quad (3)$$

$$\delta = \frac{r}{t_{mr}}, \quad (4)$$

где t_{mr} – расчетная толщина самого тонкого пояса стенки, м; E – модуль упругости стали, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; H_r – высота стенки резервуара, м; H_r – редуцированная высота стенки, м, вычисляется по формуле:

$$H_r = \sum_{i=1}^n h_i \cdot \left(\frac{t_{mr}}{t_{ir}} \right)^{2,5}, \quad (5)$$

где t_{ir} – расчетная толщина i пояса стенки, м; h_i – высота пояса резервуара, м.



Коэффициент C_0 рекомендуется определять по формулам:

$$C_0 = \begin{cases} 0,04 + 40/\delta & \text{при } 400 \leq \delta < 1220 \\ 0,085 - 10^{-5}\delta & \text{при } 1220 \leq \delta < 2500, \\ 0,065 - 2 \cdot 10^{-6}\delta & \text{при } 2500 \leq \delta < 5000 \end{cases} \quad (6)$$

Кольцевые напряжения для определения устойчивости резервуара определяются по формуле:

$$\sigma_k = k \cdot p_w \cdot \delta, \quad (7)$$

где k – коэффициент учета изменения ветрового давления по высоте стенки, принимаем для типа местности В – $k = 0,575$; p_w – нормативное значение ветрового давления, МПа, определяем для II ветрового района, в котором расположен рассматриваемый резервуар, $p_w = 0,23$ кПа.

По формуле (4) определяем параметр δ , при этом в качестве самого тонкого пояса стенки принимаем 5-й пояс с расчетной толщиной 5 мм:

$$\delta = \frac{15,18}{2 \cdot 0,005} = 1518,$$

$$\delta = \frac{10,43}{2 \cdot 0,005} = 1043.$$

Так как $1220 \leq 853 < 2500$, то по формуле (6) для резервуара 2000 м^3 :

$$C_0 = 0,085 - 10^{-5} \cdot 1518 = 0,070.$$

Так как $400 \leq 1053 < 1220$, то по формуле (6) для резервуара 1000 м^3 :

$$C_0 = 0,04 - 40/1043 = 0,078.$$

Определяем критические продольные напряжения по формуле (2) для резервуара 2000 м^3 :

$$\sigma_{\text{пркр}} = 0,070 \cdot \frac{2 \cdot 10^{11}}{1518} = 9,2 \text{ МПа}$$

Определяем критические продольные напряжения по формуле (2) для резервуара 1000 м^3 :

$$\sigma_{\text{пркр}} = 0,078 \cdot \frac{2 \cdot 10^{11}}{1043} = 15,02 \text{ МПа}$$

Редуцированная высота стенки по формуле (5) равна для резервуаров 1000 и 2000 м^3 :

$$H_r = 1,5^{2,5} \cdot \left[\left(\frac{5}{6} \right)^{2,5} + \left(\frac{5}{5,86} \right)^{2,5} + \left(\frac{5}{5,71} \right)^{2,5} + \left(\frac{5}{5,57} \right)^{2,5} + \left(\frac{5}{5,43} \right)^{2,5} + \left(\frac{5}{5,29} \right)^{2,5} + \left(\frac{5}{5,14} \right)^{2,5} + \left(\frac{5}{5} \right)^{2,5} \right] = 9,6 \text{ м},$$

Вычисляем критические кольцевые напряжения по формуле (3) для резервуара 2000 м^3 :

$$\sigma_{\text{кр}} = 0,55 \cdot \frac{15,18 \cdot 2 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 9,6 \cdot \sqrt{1518^3}} = 1,47 \text{ МПа},$$

Вычисляем критические кольцевые напряжения по формуле (3) для резервуара 1000 м^3 :

$$\sigma_{\text{кр}} = 0,55 \cdot \frac{10,43 \cdot 2 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 9,6 \cdot \sqrt{1043^3}} = 1,77 \text{ МПа},$$

Кольцевые напряжения по формуле (7) равны для резервуаров 2000 м^3 и 1000 м^3 :

$$\sigma_k = 0,575 \cdot 245 \cdot 1518 = 0,21 \text{ МПа},$$

$$\sigma_k = 0,575 \cdot 230 \cdot 1043 = 0,14 \text{ МПа},$$

Выполняем проверку условия (1) для резервуара 2000 м^3 , где значение продольного напряжения для 5-го пояса резервуара принимаем из таблицы 2:

$$\frac{0,65}{20,37} + \frac{0,11}{1,37} \leq 1,$$

$$0,11 \leq 1,$$

Следовательно, устойчивость резервуара объемом 400 м^3 обеспечивается.

Выполняем проверку условия (1) для резервуара 1000 м^3 , где значение продольного напряжения для 8-го пояса резервуара принимаем из таблицы 3:



$$\frac{0,77}{9,2} + \frac{0,2}{1,47} \leq 1,$$
$$0,23 \leq 1,$$

Следовательно, устойчивость резервуара объемом 1000 м³ обеспечивается.

Список литературы:

1. СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности: издание официальное: утвержден приказом МЧС России от 26 декабря 2013г. № 837: дата введения 2014-01-01 – Текст: электронный доступ: <https://docs.cntd.ru/document/1200108948?section=text> (дата обращения 27.10.2025).
2. РД 153-39-019-97 «Методические указания по определению технологических потерь нефти на предприятиях нефтяных компаний Российской Федерации» от 01.01.1998 – Текст: электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/1200021671> (дата обращения 27.10.2025).
3. ГОСТ 31385-2016 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов: актуализированная редакция ГОСТ 31385-2008: издание официальное: утвержден приказом федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 августа 2016 г. № 982-ст: дата введения 2017-03-01 – Текст: электронный доступ: <https://docs.cntd.ru/document/1200073853> (дата обращения 27.10.2025).
4. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов (СТО-СА-03-002-2009)/ Колл. авт. – 1-е изд. – Российская ассоциация экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности (Ассоциация Ростехэкспертиза), М., 2009 – 216 с. – Текст: электронный доступ: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293828/4293828021.pdf> (дата обращения 27.10.2025).

