

УДК 624.014

**Чичулін В.П.**

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

**Чичуліна К.В.**

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

## ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ВУГЛЕВОДНІВ

*У статті представлено загальний алгоритм розрахунку сталевих резервуарів для зберігання вуглеводнів. Наведені класифікації резервуарів і виявлені вимоги щодо зберігання газу і нафтопродуктів. У роботі проаналізовані основні види й особливості резервуарів. Розглянуті характеристики умов роботи елементів резервуара. Приведені фізичні властивості складників ємностей, що розглядаються.*

**Ключові слова:** сталеві резервуари, вуглеводні, проектування, зберігання.

**Постановка проблеми.** В умовах перманентного розвитку будівельного ринку в Україні зростають і вимоги до будівельних конструкцій і споруд. Особливий інтерес для наукової спільноти та широкого загалу користувачів становлять резервуари для зберігання вуглеводнів. Необхідно відзначити, що під час зберігання вуглеводневої сировини виникають певні складнощі за рахунок якостей таких речовин. Вони вважаються вогнетя вибухонебезпечними, високочутливими, відсутні можливості зміни характеристик вуглеводневої сировини. У виборі головних критеріїв створення оптимальних умов зберігання нафти та газу важливим фактором є проектування резервуарів відповідно до сучасних норм і вимог. Для розгляду особливостей конструювання резервуарів велике значення мають тип розміщення і конструктивні особливості резервуарів. Важливим чинником є фізико-хімічні характеристики матеріалу резервуарів.

Класифікуючи наявні види резервуарів, можна відсортувати їх за способом розташування в просторі: вертикальні і горизонтальні, наземні і підземні; за формою: прямокутні, циліндричні та краплеподібні; за товщиною: одностінні і двостінні. Також важливим фактором є визначення ключових показників, які допоможуть вести облік продуктів. Наприклад, важлива маса нафти в резервуарі. Загалом є кілька способів її визначення, але в традиційних випадках у розрахунок приймається об'єм резервуара і густина нафтопродуктів. Для подальшого розгляду факторів безпечної експлуатації резервуарів важливим пунктом є регулярне очищення та проведення моніторингу. Це дозволяє попередити можливі аварії та пожежонебезпечні ситуації, а також виявлення дефек-

тів на початковій стадії. Отже, питання проектування резервуарів для зберігання вуглеводнів і їх подальше обслуговування є сьогодні актуальними та вимагають сучасних проектних підходів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У [1] науковцями систематизовано проблемні питання будівництва й експлуатації нафтових вертикальних сталевих резервуарів у складних інженерно-геологічних умовах. Ряд авторів у роботі [2] розглядають задачу визначення показників надійності елементів вертикального сталевого резервуара під час експлуатації. Проведені розрахунки ймовірності безвідмовної роботи як окремих елементів, так і резервуара загалом. Розроблено відповідні математичні моделі для визначення ймовірності безвідмовної роботи резервуара в експлуатації. У [3] отримані результати, що підтверджують правомірність застосування гіпотези «слабкої ланки» для моделювання показників надійності сталевих резервуарів для тривалого зберігання нафтопродуктів. Запропоновані моделі дозволяють отримати комплексну імовірнісну оцінку технічного стану резервуарів. Параметри цих моделей можуть коригуватися за даними натурних обстежень, що підвищує точність оцінки у кожному окремому випадку. Ці моделі можуть застосовуватися як прогнозні на стадії проектування резервуарів і як моделі управління надійністю в період експлуатації цих споруд. Вони можуть служити ефективним математичним інструментом у дослідженні проблем надійності та довговічності нафтових резервуарів. У роботі [4] пропонуються метод і система оцінки зміни НДС стінки резервуарів вертикальних сталевих (далі – РВС) за даними про переміщення точок її поверхні без визначення сил і навантажень, що

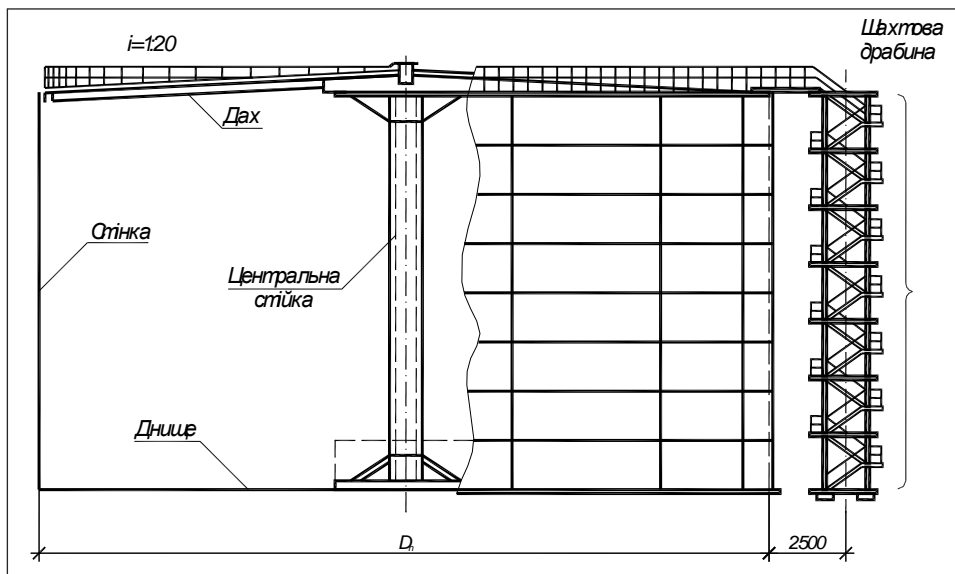


Рис. 1. Фасад і розріз вертикального циліндричного резервуара

діють на резервуар, із використанням згладжувачих сплайнів для відтворення стінки РВС за координатами окремих точок. Останнє дає змогу зменшити вплив похибки вимірювання з урахуванням просторового переміщення стінки, дефектів форми стінки та впливу зварних з'єднань РВС. Загалом у ряді нормативних документів [5–9] представлені основи розрахунку сталевих резервуарів і ємностей для зберігання нафти та газу. Але існує необхідність наукового обґрунтування поетапного розрахунку такого типу споруд.

**Постановка завдання.** З огляду на проведений аналіз досвіду проектування резервуарів для зберігання вуглеводнів було сформовано мету і задачі дослідження. Вони полягають у представленні науково-обґрунтованого алгоритму розрахунку резервуарів для зберігання нафти та газу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Резервуарами називаються посудини, призначені для приймання, зберігання, технологічної обробки і відпуску різних рідин, нафти, нафтопродуктів, зріджених газів, води, водного аміаку, технічного спирту тощо. Вертикальні циліндричні резервуари (рис. 1) використовуються за надлишкового тиску у пароповітряній зоні до 2 кПа і вакуумі до 0,25 кПа. Ці резервуари мають плоскі днища, виготовлені зі сталевих листів товщиною 4–6 мм, і стінки у вигляді ряду поясів, товщина яких збільшується пропорційно росту тиску рідини в міру наближення до днища.

Основними елементами такого резервуара виступає стінка (корпус), днище та покрівля (покриття), виконані з листової сталі. Експлуата-

ційне обладнання резервуара складається з арматури (пристроїв для наливу, заміру та випуску рідини, запобіжних клапанів) і пристроїв для чищення й огляду (сходів, світлового та замірного люків, лазів).

**Призначення розмірів резервуара.** Оптимальна висота корпусу резервуара визначається за формулою (1):

$$H_{opt} = \sqrt{\Delta \cdot R_{wy} \cdot \gamma_c / (\gamma_{f,l} \cdot \gamma_g)} \quad (1),$$

де  $\Delta = 0.9$  см – сума приведених товщин днища та покрівлі (табл. 1);

$R_{wy} = R_y = 24$  кН/см<sup>2</sup> – розрахунковий опір зварного шва (табл. Г.2 [6]), з урахуванням того, що зварні з'єднання виконуються з фізичним контролем якості шва;

$\gamma_g$  – питома вага палива, визначається за табл. 2;

$\gamma_{f,l} = 1.1$  – коефіцієнт надійності за навантаженням від гідростатичного тиску рідини;

$\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи (табл. 5.1. [6])

Таблиця 1

**Приведені товщини для резервуарів**

$V$ , тис. м <sup>3</sup>	1	2	3	4	8	12	16	20
$\Delta$ , см	0,8	0,9	1,05	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8

Ця висота повинна бути кратною ширині стандартного листа з урахуванням острожки кромки. Потрібна довжина розгортки:

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{V}{\pi H_0}} \quad (2),$$

де  $H_0$  – висота залива резервуара продуктом.

За компоновання стінки резервуара радіус облонок корпусу складає:

Таблиця 2

Щільність і питома вага рідин,  
що зберігаються у резервуарах

Назва рідини	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Питома вага, кН/см <sup>3</sup>
Ацетон	800	7,85×10 <sup>-6</sup>
Бензин (легкий)	700	6,87×10 <sup>-6</sup>
Бензол	880	8,63×10 <sup>-6</sup>
Гліцерин	1 260	1,24×10 <sup>-5</sup>
Дизельне паливо	1 000	9,81×10 <sup>-6</sup>
Керосин	800	7,85×10 <sup>-6</sup>
Спирт (ректифікат)	830	8,14×10 <sup>-6</sup>
Етиловий спирт	790	7,75×10 <sup>-6</sup>
Ефір	720	7,06×10 <sup>-6</sup>
Мазут	960	9,4×10 <sup>-6</sup>

$$r = (L - n_{\text{рул}} \cdot \delta) / (2\pi) \quad (3),$$

де  $n_{\text{рул}}$  – кількість рулонів стінки резервуара;  $\delta$  – сумарна довжина накладання в одному монтажному стику (приймається в межах 140÷200 мм);

$$L = -2\pi \sqrt{\frac{V}{\pi H_0}} - \text{довжина стінки резервуара.}$$

Фактичний об'єм резервуара:

$$V_{\text{факт}} = \pi r^2 H_1 \quad (4)$$

Розходження із заданим об'ємом складає  $(V_{\text{факт}} / V - 1) \cdot 100\% = (4550 / 4500 - 1) \cdot 100\% = 1.11\%$ .

Детально представимо розрахунок стінки резервуарів. Розрахунок виконується на основі формул (5), (6):

$$t_w = \frac{N_{r,1} \gamma_n}{\gamma_c R_{\text{вы}}} + c_1 + c_2 = \frac{[\gamma_g \gamma_{f,l} h_p + p_0 \gamma_{f,p}] \cdot r}{\gamma_c R_{\text{вы}}} \gamma_n + c_1 + c_2 \quad (5),$$

де  $t_w$  – товщина стінки на рівні  $x$ ;

$N_{r,1}$  – внутрішнє зусилля на пояс (за розрахунку міцності);

$\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи за табл. 3;

$h_p = h - h_l \cdot (n_i - 1) - x_l$  – висота розрахункового рівня;

$h$  – відстань до розрахункового рівня рідини;

$h_l$  – конструктивна висота поясу (1 490, 1 790, 1 990 мм);

$n_i$  – порядковий номер поясу за рахування знизу;

$p_0$  – характеристичне значення надлишкового тиску у пароповітряному середовищі;

$r = R_2$  – радіус резервуара;

$\gamma_{f,l} = 1.1$  та  $\gamma_{f,p} = 1.2$  – відповідно коефіцієнти надійності за навантаженням для гідростатичного тиску та надлишкового тиску пароповітряної суміші:

$$y = \frac{N_{r,2}}{Et_w} r = \frac{[\gamma_g (h \cdot h_l \cdot (n_i - 1) \cdot x_l) + p_0] \cdot r}{Et_w} r \quad (6),$$

Таблиця 3

Коефіцієнти умов роботи для розрахунку  
елементів вертикальних циліндричних  
резервуарів

Вид і місце розрахунку	Коефіцієнт умов роботи $\gamma_c$
Стінки за розрахунку на міцність:	
нижній пояс	0,6
інші пояси	0,7
Спряження стінки із днищем	1,2
Стінки резервуарів за розрахунку на стійкість	1,0
Сферичні та конічні покриття розпірної конструкції за розрахунку за безмоментною теорією	0,9

де  $E = 2.06 \cdot 10^4$  кН/см<sup>2</sup> – модуль пружності сталі;

$N_{r,2}$  – внутрішнє зусилля на пояс (за розрахунку жорсткості);

$t_w$  – товщина стінки у місці перевірки жорсткості.

Враховується, що стінка буде складатися з  $n$  поясів (змінна  $n_i \in [1 \div 8]$ ). Усі пояси набираються з листів 6000×1500 мм. Під час обробки кромки листів (острожка на кромкостругальних станках) на кожній кромці листа прибирається по 5 мм. Додаток на корозію приймається  $c_1 = 1.0$  мм, мінусові допуски на прокат приймаються за таблицею 4. Крім того, товщина поясу не повинна бути меншою за 5 мм. Максимальний рівень заповнення резервуара  $h$  приймаємо рівним його конструктивній висоті  $H$ .

Таблиця 4

Мінусові допуски на товщину сталевих листа  
згідно з ГОСТ 14637 Г.5 [6]

Товщина листа, мм	Ширина листа, мм		
	1000÷1500	1500÷2000	2000÷2300
від 3,9 до 5,5	-0.50	-0.50	-0.50
від 5,5 до 7,5	-0.60	-0.60	-0.60
від 7,5 до 25,0	-0.80	-0.80	-0.80
від 25,0 до 30,0	-0.90	-0.90	-0.90
від 30,0 до 34,0	-1.0	-1.0	-1.0

Для першого (нижнього) поясу товщина стінки буде визначатися таким чином. Висота розрахункового рівня становить:

$$h_p = h - h_l (n_i - 1) - x_l \quad (7)$$

Внутрішнє зусилля на пояс (за розрахунку міцності):

$$N_{r,1} = [\gamma_r \gamma_{f,l} h_p + p_o \gamma_{f,p}] \cdot r. \quad (8)$$

Внутрішнє зусилля на пояс (за розрахунку жорсткості):

$$N_{r,2} = [\gamma_g h_p + p_o] \cdot r. \quad (9)$$

Розрахункова товщина стінки без урахування допусків  $c_1$  та  $c_2$ :

$$t_{w,p} = \frac{N_{r,1} \gamma_n}{\gamma_c R_{wy}} \quad (10),$$

де  $R_{wy}$  – розрахунковий опір зварних швів (приймається рівним розрахунковому опору за межею плинності  $R_y$  з фізичним контролем якості швів або  $0.85R_y$  – без фізичного контролю якості швів);

Розрахункова товщина стінки з урахуванням допусків на корозію та мінусові допуски на прокат:

$$t_w = t_{w,p} + c_1 + c_2. \quad (11)$$

За сортаментом товстості сталі (ГОСТ 14637 Г.5 [6]) приймаємо товщину першого (нижнього) поясу  $t_w$ .

Фактичне напруження у стінці корпусу із прийнятою товщиною  $t_w$ :

$$\sigma_2 = \frac{N_{r,1}}{t_w} < \frac{R_{wy} \gamma_c}{\gamma_n}. \quad (12)$$

Прогин корпусу (радіальне зміщення) у місці розташування першого (нижнього) поясу за формулою (13):

$$y = \frac{N_{r,2}}{Et_w} r. \quad (13)$$

Розрахунок другого та наступних поясів загалом виконується відповідно до вищевказаного алгоритму, однак має дві особливості. Перша полягає у необхідності уточнювати поправку  $x_c$  за формулою (14), що впливає на визначення висоти розрахункового рівня  $h_p$ , друга – у використанні коефіцієнта умов роботи зі значенням  $\gamma_c = 0.7$  (замість  $\gamma_c = 0.6$ ).

$$x_c = 0.6 \sqrt{r \cdot t_w} \quad (14),$$

де  $r$  – радіус резервуара;

$t_w$  – товщина поясу.

**Висновки.** У дослідженні було представлено загальний алгоритм розрахунку сталевих резервуарів для зберігання вуглеводнів. Наведено класифікацію сталевих резервуарів і виявлені основні вимоги до зберігання газу і нафтопродуктів. Представлена типологія та характеристика наявних резервуарів для зберігання вуглеводнів.

#### Список літератури:

1. Зоценко М.Л., Вінніков Ю.Л., Харченко М.О., Ларцева І.І. Особливості проектування нафтових резервуарів у складних інженерно-геологічних умовах при сейсмічних впливах. *Academic journal. Series Industrial Machine Building. Civil Engineering*. 2017. Т. 1 (48). С. 175–182.
2. Грінченко Є.М., Соколов Д.Л., Федоренко Р.М. Визначення терміну безпечної експлуатації стінки вертикального резервуару для збереження нафтопродуктів в експлуатації. *Збірка наукових праць*. 2014. Вип. 19. С. 38–48.
3. Семенец С.Н., Насонова С.С., Власенко Ю.Е., Кривенкова Л.Ю. Расчетные модели надежности нефтяных резервуаров. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 1. С. 60–67.
4. Заміховський Л.М., Паньків Х.В., Паньків Ю.В., Дорофей І.Р. Метод і система контролю зміни напружено деформованого стану стінки вертикальних сталевих циліндричних резервуарів. *Нафтогазова енергетика*. 2013. № 1. С. 99–108.
5. Технические условия ТУ У В.2.6-28.1-02070795-001-2002. Конструкции строительные стальные стальных резервуаров вертикальных цилиндрических для нефти и нефтепродуктов объемом от 100 до 50000 м<sup>3</sup>. ДонГАСА, 2005. 50 с.
6. ДБН В.2.6-163:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. Київ, 2014. 196 с.
7. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Київ, 2006. 59 с.
8. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ, 2009. 49 с.
9. ДБН В.2.2-58,2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3. Київ, 1994. С. 95.

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

В статье представлен общий алгоритм расчета стальных резервуаров для хранения углеводородов. Приведены классификации существующих резервуаров и выявлены требования по хранению газа и нефтепродуктов. В работе проанализированы основные виды и особенности резервуаров. Рассмотрены характеристики условий работы элементов резервуара. Приводятся физические свойства составляющих заполнителей ёмкостей.

**Ключевые слова:** стальные резервуары, углеводороды, проектирование, хранения.

---

**DESIGN OF STEEL TANKS FOR STORAGE OF HYDROCARBONS**

*The article presents a general algorithm for calculating steel tanks for storing hydrocarbons. Classifications of existing tanks are given and requirements for gas and oil products storage are identified. The paper analyzes the main types and characteristics of tanks. The characteristics of the working conditions of reservoir elements are considered. The physical properties of the constituents of the considered capacities are given.*

**Key words:** *steel tanks, hydrocarbons, designing, storage.*