



УДК 004.05

Ар.А. МУХА\*, О.В. ФЕДУХІН\*

## ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ НАФТИ ТА НАФТОПРОДУКТІВ

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Анотація.** У статті розглянуто вирішення низки проблем, пов'язаних з визначенням залишкового ресурсу сталевих циліндричних резервуарів. При дослідженні негативних чинників основна увага приділяється урахуванню корозійних пошкоджень, які виникають у процесі експлуатації. Як визначальний параметр корозійного зносу запропоновано використовувати залишкову товщину стінки, дна та даху конструкцій. У статті допускається, що прогнозування залишкового ресурсу полягає у визначенні розрахунковим шляхом його мінімальної оцінки. Також у роботі встановлено допустимий ступінь зносу досліджуваних конструкцій. Для цього у статті визначено поняття граничного стану, що базується на критичному зменшенні товщини елементів конструкції на заданій частині площі поверхні до граничної величини, нижче якої не забезпечується необхідний запас несучої заданості. На основі експериментальних даних у наведеному прикладі встановлено залишковий та загальний ресурс служби сталевих циліндричних резервуарів. Отримані результати є співрозмірними з допустимими нормами та строками експлуатації, вказаними в нормативних документах. У статті визначено критерії оцінки залишкового ресурсу сталевих циліндричних резервуарів, за рахунок використання яких можливо знизити експлуатаційні витрати, збільшивши міжремонтні інтервали. Такий ефект досягається завдяки використанню ймовірно-фізичного підходу для здійснення оцінки об'єктивного технічного стану та виконання прогнозування залишкового ресурсу вказаних конструкцій за відсутності значної статистики відмов. У рамках запропонованого ймовірно-фізичного підходу щодо оцінки довговічності пропонується ймовірна модель на основі DM-розподілу відмов. Параметри такої моделі у своїй основі мають фізичну інтерпретацію, а як основні параметри враховуються середня швидкість зміни визначального параметра та коефіцієнт варіації узагальненого процесу деградації.

**Ключові слова:** ймовірно-фізичний підхід, залишковий ресурс, модель надійності.

**Abstract.** The article considers the solution to a number of problems related to the determination of the residual life of steel cylindrical tanks. In the study of negative factors, the main attention is paid to the consideration of corrosion damage that occurs during operation. As a determining parameter of corrosion wear, it is proposed to use the residual thickness of the wall, bottom and roof of structures. The article assumes that forecasting the residual resource includes determining its minimum estimate through calculations. Also, the admissible degree of demolition of investigated designs is established in the work. To do this, a concept of the limit state is established, which is based on the critical reduction of the thickness of the structural elements on a given part of the surface area to the limit value, below which the required margin of the bearing setpoint is not provided. On the basis of the experimental data in the given example the residual and total service life of steel cylindrical tanks is established. The obtained results are commensurate with the allowable standards and service life specified in the regulations. The article establishes the criteria for estimating the residual life of steel cylindrical tanks due to the use of which it is possible to reduce operating costs by increasing the repair intervals. This effect is achieved through the use of the probabilistic-physical approach to assess the objective technical condition and predict the residual life of these structures in the absence of significant failure statistics. Within the framework of the proposed probabilistic-physical approach to estimating durability, a probabilistic model based on the

*DM-distribution of failures is proposed. The parameters of such a model are based on physical interpretation, and the main parameters are the average rate of change of the determining parameter and the coefficient of variation of the generalized degradation process.*

**Keywords:** probabilistic-physical approach, residual life, probabilistic-physical model of reliability.

DOI: 10.34121/1028-9763-2022-3-174-181

## 1. Вступ

Нафтовий резервуарний парк України налічує десятки тисяч найрізноманітніших резервуарів, які представляють собою об'єкти підвищеної небезпеки. Руйнування або порушення їх цілісності спричиняють значні матеріальні збитки у виді витоків, забруднень та пожеж, а такі аварії стають подіями з розряду катастроф державного масштабу.

Основну частину фонду резервуарів складають сталеві циліндричні резервуари (СЦР), а проблеми їх тривалої експлуатації були й залишаються актуальними через повільні темпи оновлення основного обладнання в нафтогазовій галузі [1]. Наявний резервуарний парк має значний запас, який дозволяє продовжити час безпечної експлуатації СЦР після проведення технічного обстеження та розрахункової оцінки залишкового ресурсу.

Враховуючи значні дослідження у області визначення залишкового ресурсу, методики, що базуються на врахуванні визначальних параметрів та включають аналіз тренду відмов, є найпоширенішими і мають саме широке застосування.

Отже, метою статті є відпрацювання методики визначення залишкового ресурсу СЦР з урахуванням корозійного зносу. Основою такої методики може бути діагностична модель зміни визначальних параметрів за рахунок встановлення зв'язку між даними випробувань і допустимими (граничними) значеннями визначального (ресурсного) параметра та іншими діагностичними параметрами.

## 2. Постановка проблеми

Обсяги, структура і періодичність відновлення СЦР у вітчизняних нормативних документах [2] визначені значною мірою наближено. А питання економічної ефективності і доцільності дослідженні недостатньо. Така ситуація, що склалася у практиці ревізій технічного стану (РТС), які перебувають в експлуатації, вимагає розроблення нових математичних моделей і методів забезпечення експлуатаційної надійності шляхом РТС з урахуванням накопиченого статистичного матеріалу про дефекти і пошкодження цих споруд.

Результати натурних обстежень таких об'єктів показують, що їх експлуатаційна надійність вирішальною мірою визначається нечисленними, але типовими для даних споруд, видами дефектів та пошкоджень. До типових дефектів відносяться дефекти геометричної форми циліндричної стінки, тріщиноподібні дефекти та можливе вихідне зменшення товщини конструктивних елементів у результаті мінусових допусків на товщину прокату. Одним з основних видів фізичного зносу є корозія елементів конструкції.

## 3. Теоретичні основи витрачання ресурсу СЦР резервуарів внаслідок корозії

Як показують результати досліджень [3], глибина корозійних пошкоджень зі збільшенням терміну експлуатації зростає й досягає для стінок максимально 2,0 мм, для дна – 3,0–4,0 мм. Найпоширенішим видом корозії є виразкова (піттингова) корозія, а інтенсивність корозії на листах днища майже вдвічі вища, ніж на листах стінки резервуарів.

У статті [4] наводиться детальний розгляд формул, що можуть бути застосовані для математичного моделювання швидкості корозії. Різними авторами було запропоновано різні емпіричні формули, але так як корозія є електрохімічним процесом, то визначальною умовою її перебігу є утворення гальванічної пари. Саме тому найвірнішою виглядає формула, запропонована у роботі [5], яка виведена з залежності струму електрохімічного розчинення напруженого електрода:

$$V = V_0 \cdot e^{\frac{V_m \cdot \sigma_{cp}}{RT}}, \quad (1)$$

де  $V$  – швидкість корозії;

$V_0$  – швидкість корозії ненавантаженого металу (табл. 1);

$V_m$  – мольний об'єм металу;

$R$  – універсальна газова стала;

$T$  – абсолютна температура;

$\sigma_{cp}$  – середнє навантаження в металі.

Таблиця 1 – Середня швидкість корозії ненавантажених зразків сталі, мм/рік

Марка сталі	Групи агресивності середовища			
	I неагресивна	II слабо агресивна	III середньо агресивна	IV сильно агресивна
Ст3	0,001...0,005	0,01...0,06	0,05...0,10	0,2...0,4
10Г2С1	0,001...0,005	0,01...0,06	0,05...0,10	0,2...0,4
18Г	0,001...0,005	0,01...0,06	0,05...0,10	0,2...0,4

Прогнозування залишкового ресурсу полягає у визначенні розрахунковим шляхом його мінімальної оцінки. Розрахункова оцінка може бути використана при призначенні строку наступного діагностування, а також при розробці його утримувачем майбутніх ремонтних заходів.

Граничним станом є зменшення товщини його елементів на заданій частині площі поверхні до граничної величини, нижче якої не забезпечується необхідний запас несучої заданості.

Оскільки резервуар є будовою, яка складається з нерівно зносостійких елементів, таких як дах, стінка та днище, що мають різний знос та тип старіння, тому визначальні параметри слід обирати, враховуючи їх конструктивні параметри (табл. 2) та технічний стан.

Резервуар не варто експлуатувати, якщо хоча б один елемент досягнув свого критичного стану.

Таблиця 2 – Конструктивні параметри типових резервуарів

№ № п/п	Об'єм резервуара, м <sup>3</sup>	Висота стілки, м	Діаметр, м	К-сть поясів, шт.	Товщина поясів, мм	Товщина дна, мм	Товщи- на пок- рівлі, мм
1	1000	8,94	12,3	6	5,4,4,4,4,4	4	2,5
2	1000	11,92	10,4	8	4,4,4,4,4,4,4	4	2,5
3	2000	11,92	15,2	8	6,5,4,4,4,4,4	5	2,5
4	3000	11,92	19	8	8,6,5,5,5,5,5	5	2,5
5	5000	11,92	22,8	8	10,8,7,6,6,6,6,6	5	2,5
6	5000	14,9	10,5	10	10,8,7,6,6,6,6,6,6,6	5	2,5

Залишкова товщина стінки визначається з урахуванням рівня небезпечності продуктів, що зберігаються в резервуарі, умов стійкості і герметичності конструкції й можуть регламентуватися відповідними документами та інструкціями [2].

У середньому допустимий корозійний знос листів конструкції з урахуванням допустимого запасу досягає 30%.

#### 4. Статистична обробка результатів досліджень корозійного пошкодження резервуара

Для отримання достовірних даних про фактичний стан досліджуваних конструкцій і проведення технічної діагностики та/або експертне обстеження резервуарів можуть бути проведені дослідження й виконані вимірювання вимірів товщин стінок, даху та дна. Для цього визначаються найнебезпечніші місця та типи ураження. Детально ця процедура розглядається авторами у [6]. На основі отриманих даних та виконання розрахунків необхідно встановити:

1. Визначення мінімального необхідного числа вимірювань (об'єму вибірки).
2. Оцінку однорідності отриманої вибірки.
3. Визначення коефіцієнта варіації і параметрів розподілу глибин руйнування.
4. Визначення максимальної глибини руйнування з урахуванням масштабу поверхні.
5. Обчислення середньої швидкості зміни глибини руйнування.
6. Обчислення середнього залишкового ресурсу.

*Визначення мінімального числа точок поверхні вимірювань.*

Вибір необхідного мінімального числа точок  $N$  поверхні вимірювань слід здійснювати відповідно до табл. 3, залежно від необхідної довірчої ймовірності  $\gamma$ , допустимої помилки  $\delta$  та ступеня нерівномірності руйнування поверхні, що характеризується коефіцієнтом варіації глибин руйнування  $\nu$ .

Таблиця 3 – Мінімальне число  $N$  точок для вимірювань

$\delta$	$\gamma$	$N$ при $\nu_k$						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
0,05	0,80	4	13	25	50	100	200	315
	0,90	8	25	65	100	250	500	650
	0,95	13	40	100	150	400	650	1000
	0,99	25	100	200	315	800	1000	1000
0,10	0,80	-	5	10	13	32	50	100
	0,90	3	8	15	32	65	125	200
	0,95	5	13	25	50	100	200	400
	0,99	8	25	50	100	200	400	650
0,15	0,80	-	3	5	6	15	25	40
	0,90	-	4	8	15	32	65	80
	0,95	3	6	13	25	50	100	150
	0,99	5	13	25	40	100	200	315
0,20	0,80	-	-	3	5	10	20	25
	0,90	-	4	6	10	20	40	50
	0,95	-	5	8	15	32	50	100
	0,99	4	8	15	25	65	125	150

*Примітка.* Знак «-» означає, що число точок  $N < 3$ .

Величина коефіцієнта варіації  $\nu$  орієнтовно може бути обрана  
 при малій нерівномірності руйнувань до 0,1–0,2;  
 при значній 0,3–0,6;  
 при сильній 0,7–1,5.

Довірчу ймовірність  $\gamma$  вибирають з ряду 0,80; 0,90; 0,95; 0,99.

Максимальну припустиму відносну помилку  $\delta$  вибирають з ряду 0,05; 0,10; 0,15; 0,20.

Якщо за результатами  $N$  вимірювань отриманий коефіцієнт варіації більший за заданий, то обсяг вимірювань уточнюють та виконують додаткові вимірювання. За наявності у вибірці значень, що різко виділяються на ділянці, де отримана величина  $h_{\max}$ , необхідно провести додаткові виміри. У разі повторної появи такого значення приймається рішення про невідповідність досліджуваної ділянки резервуара вимогам та необхідність оцінки її окремо від усієї обстежуваної поверхні. Критерієм різкого виділення значення  $h_{\max}$  з вибірки є виконання умови

$$h_{\max} > \bar{h} [\ln(20N)]^y. \quad (2)$$

Обчислюють середню глибину руйнування:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N}. \quad (3)$$

Обчислюють середнє квадратичне відхилення глибин руйнування:

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2}{N-1} - \left(\frac{\delta}{3}\right)^2}, \quad (4)$$

де  $\delta$  – відносна помилка методу вимірювання.

Обчислюють коефіцієнт варіації глибин руйнування:

$$v = \frac{\sigma_h}{\bar{h}}. \quad (5)$$

## 5. Ймовірісно-фізичний метод розрахунку залишкового ресурсу СЦР за динамікою корозійних пошкоджень

Запропонована процедура прогнозування залишкового ресурсу [7] полягає у знаходженні оцінки реального технічного стану, коли існує можливість вимірювання значення ресурсного (визначального) параметра  $\Pi$  у процесі експлуатації або випробувань. Коли значення граничного визначального параметра  $\Pi_{np}$  досягає встановленого значення, це призводить до настання граничного стану СЦР, тобто відмови.

Передбачається, що завжди існує можливість виміру або встановлення значень ресурсного (визначального) параметра  $\varphi(t)$ , а також відомо або може бути задане його граничне значення  $\varphi(t) = \Pi_{np}$ .

Вимірювання значень визначального параметра проводиться через певні проміжки часу  $\Delta t$  експлуатації досліджуваного зразка. Виміряні значення можливо представити у виді ряду неубутніх значень ресурсного параметра  $\varphi(t)$ , отриманих для певних моментів напрацювання, які зростають:

$$\varphi(t_1); \varphi(t_2) = \varphi(t_1 + \Delta t); \varphi(t_n) = \varphi(t_{n-1} + \Delta t); \varphi(t_{n+1}) = \varphi(t_n + \Delta t),$$

де  $n$  – кількість приростів (вимірювань).

Як теоретична модель надійності пропонується  $DM$ -розподіл напрацювання до відмови [8], оскільки руйнування виробів є незворотним.

$$F(t) = DM(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right), \quad (6)$$

де  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU$  – нормований нормальний розподіл;

$\mu$  – параметр масштабу (середнє напрацювання до відмови);

$\nu$  – коефіцієнт варіації узагальненого процесу деградації;

$t$  – сумарне напрацювання.

Параметрична форма запису  $DM$ -розподілу виглядає так:

$$F(t) = DM(t; a, \nu) = \Phi\left(\frac{at + \Pi_1 - \Pi_0}{\nu\sqrt{at(\Pi_0 - \Pi_1)}}\right), \quad (7)$$

де  $a$  – середня швидкість зміни визначального параметра – критерію придатності;

$\Pi_0$  – початкове вимірне значення визначального параметра;

$\Pi_1$  – максимальне вимірне значення визначального параметра [7].

Визначальними параметрами  $DM$ -розподілу є середня лінійна швидкість корозійного пошкодження  $a$  та коефіцієнт варіації процесу корозії  $\nu$ .

*Примітка.* У випадку, коли не існує можливості виміру визначального параметра значення швидкості, зміна визначального параметра може бути обчислена за формулою (1).

За отриманими даними вимірювань можливо обчислити середню швидкість зміни визначального параметра:

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i. \quad (8)$$

Коефіцієнт варіації зміни визначального параметра визначають із таких рекомендацій:

- при малій нерівномірності корозійного зносу – до 0,2;
- при значній нерівномірності – 0,3–0,6;
- при сильній нерівномірності – 0,7–0,8.

Якщо під час дослідження резервуара встановлені різні види процесів корозійного пошкодження  $V_i$ , то можливо визначити їх пайову участь  $p_i$  у процентному відношенні до формування відмов. У такому разі очікуване середнє значення коефіцієнта варіації узагальненого процесу деградації можливо визначити за формулою

$$\nu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k v_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^k p_i^2}}, \quad (9)$$

де  $v_i$  – середнє значення коефіцієнта варіації  $i$ -го процесу деградації (руйнування) (наприклад: точкова, суцільна корозія, ножова корозія та ін.  $i = 1, 2, \dots, k$ ). При цьому  $\sum_{i=1}^k p_i = 1$ .

У нашому випадку при дослідженні СЦР визначальний параметр корозійного зносу змінюється монотонно (тобто спричиняє незворотні зміни, тому всі  $\Delta \varphi_i$  мають додатній

знак або деякі з них дорівнюють нулю). Тому середній залишковий ресурс можливо обчислити за такою формулою:

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(\Pi_{np} - \Pi_1)}{a} \left( 1 + \frac{v^2}{2} \right), \quad (10)$$

де  $\Pi_{np}$  – граничне значення визначального параметра (критерію придатності);

$\tau$  – момент експлуатації (сумарне напрацювання), на якому проводять оцінку рівня залишкового ресурсу (терміну служби).

### 5.1. Приклад. Оцінка залишкового ресурсу першого поясу стінки резервуара

Резервуар СЦР 5000 другого класу небезпечності має такі параметри: діаметр 22,5 м, матеріал Ст3, висота наливу 10,5 м, середня товщина листів першого поясу сінки  $h_i = 8,7$  мм, номінальна товщина  $h_0 = 10$  мм, середнє квадратичне відхилення товщини стінки  $\sigma = 0,18$  мм, строк експлуатації резервуара 18 років.

Критерій граничного стану – знос понад 30% від номінальної товщини стінки, максимально допустима глибина корозії  $10 \cdot 0,3 = 3$  мм, мінімально допустима товщина стінки першого поясу  $t_{min} = 10 - 3 = 7$  мм.

Середня глибина корозії  $\bar{h} = h_0 - h_i = 10 - 8,7 = 1,3$  мм.

Обчислюють середнє квадратичне відхилення глибин руйнування:

$$\sigma = 0,18 \text{ мм.}$$

Обчислюють коефіцієнт варіації глибин руйнування:

$$v = \frac{\sigma_h}{\bar{h}} = 0,18 / 1,3 = 0,138$$

Середня швидкість корозії ненавантажених зразків сталі Ст3 в умовах III групи агресивності середовища складає орієнтовно від 0,05 до 0,10 мм/рік. Резервуар РВС 5000 є ненавантажений на 50%, тому підрахуємо фактичну швидкість корозії за результатами підконтрольної експлуатації (табл. 4).

Таблиця 4 – Приклад залежності середньої глибини корозії СЦР від терміну експлуатації

№ п/п	Строк експлуатації $t$ , годин	Остаточна товщина стінки $h$ , мм	Середня глибина корозії $\bar{h}$ , мм
1	52560	9,8	0,5
2	105120	9,5	0,9
3	157680	9,2	1,3

За даними вимірів, наведених у (табл. 5), можливо обчислити середню швидкість зміни визначального параметра, а саме середнього корозійного зносу:

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i .$$

$\Delta t = 52560$  год;

$\Delta \varphi_1 = 0,5$  мм;

$$\Delta\varphi_2=0,4 \text{ мм};$$

$$\Delta\varphi_3=0,4 \text{ мм};$$

$$a=1,3/52560*3=0,00000824 \text{ мм/год}; =0,0721 \text{ мм/рік};$$

$P_1=1,3$  мм – максимальне вимірне значення визначального параметра;

$P_{np}=3$  мм – граничне значення визначального параметра.

Далі можливо обчислити значення залишкового ресурсу СЦР на момент напрацювання  $\tau=157680$  год:

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(P_{np} - P_1)}{a} \left( 1 + \frac{v^2}{2} \right) = 206310,68 * 1,0072 = 208275 \text{ годин} = 23,77 \text{ років.}$$

Обчислюємо повний середній ресурс резервуара:

$$R = \tau + \tilde{\pi}(r) = 157680 + 208275 = 402126 \text{ год.} = 41,77 \text{ років.}$$

## 6. Висновки

На модельному прикладі продемонстровано застосування ймовірнісно-фізичного методу оцінки залишкового ресурсу СЦР.

Запропонований у статті метод дозволив отримати значення  $R=41,77$  років для повного ресурсу дослідженого СЦР. Отримані результати є співрозмірними з допустимими нормами та строками експлуатації [2] для резервуарів даного типу, що цілком підтверджує справедливості наведених розрахунків.

Якщо розрахункова оцінка залишкового ресурсу перевищує в 2–3 рази регламентований строк експлуатації, то це означає, що обраний як фактор діагностичний параметр не є визначальним.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Гайсин Э.Ш., Гайсин М.Ш. Современное состояние проблемы обеспечения надежности резервуаров для нефти и нефтепродуктов. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2016. № 2. С. 32–40.
2. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції з їхнього ремонту. Вид. офіц. Київ: Укрнафтопродукт, 1997. 297 с.
3. Аммосов Г.С., Иванов Дж.С., Аммосов А.П. Особенности коррозионного истощения ресурса резервуаров и оценка интенсивности возрастания напряженного состояния в сварных швах. *Наука и образование*. 2017. № 1. С. 75–80.
4. Овчинников И.Г., Кудайбергенов Н.Б., Шейн А.А. Эксплуатационная надежность и оценка состояния резервуарных конструкций. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1999. 316 с.
5. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов (ПБ 03-605-03). Серия 03, Вып. 3. М.: ФГУП Научно-технический центр по безопасности в промышленности, 2005. 176 с.
6. Нормативный документ межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Экспертиза промышленной безопасности стальных вертикальных сварных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. СТО 03-001-06. Москва, 2006. 242 с.
7. Федухін О.В., Муха Ар.А. Оцінка залишкового ресурсу контактної провладу електрофікованих залізничних доріг. *Математичні машини і системи*. 2022. № 2. С. 91–101.
8. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надёжности электронных элементов и систем. К.: Логос, 2002. 486 с.

*Стаття надійшла до редакції 27.06.2022*