



## **Determination of Residual Resource and Reliability of Vertical Tanks for Petroleum Products**

Tatyana MECHKAROVA, Georgi ANTONOV, Dian NIKOLOV

Technical University; Varna, Bulgaria,  
e-mails: [tatqna13@abv.bg](mailto:tatqna13@abv.bg), [gea\\_print@abv.bg](mailto:gea_print@abv.bg), [nikolov.dian@gmail.com](mailto:nikolov.dian@gmail.com)

### **Abstract**

Vertical cylindrical steel tanks for storing oil and oil products are classified as dangerous equipment. During their long-term operation, processes occur that reduce their safety and increase the risk of accidents. In order to reduce the risk of partial or complete destruction of the tank, it is necessary to carry out periodic inspection and diagnostics of the equipment. This includes surveying the condition of the tanks, assessing the suitability of the various elements, determining the safe mode for operation, assessing the residual resource.

**Keywords:** residual resource, vertical tanks, petroleum products

## **Определяне остатъчен ресурс на използване и надежност на стоманени вертикални резервоари за съхранение на нефтени продукти**

Татяна МЕЧКАРОВА, Георги АНТОНОВ, Диян НИКОЛОВ

### **1. Увод**

Стоманените резервоари са едни от най широко използваните съоръжения за съхранение на суровини от различен характер, тъй като специфичните им технологични характеристики, които ги правят незаменими в това отношение.

Вертикалните цилиндрични стоманени резервоари за съхраняване на нефт и нефтопродукти се отнасят към опасните, експлоатирани в промишлеността, съоръжения. По време на продължителната им експлоатация протичат процеси, които намаляват тяхната сигурност и повишават риска от аварии. Такива процеси са например слягането на фундамента, корозия по метала, умора на материала, прекомерно отклонение на конструкцията от проектната форма. Аварииите по резервоарите са свързани с големи материални загуби (цената на съхранявания продукт многократно надвишава стойността на самото съоръжение), екологично замърсяване, опасност от пожар и човешки жертви.

За да се намали риска от частично или пълно разрушение на резервоара с всички произтичащи от това проблеми е необходимо да се извършва периодичното му инспектиране и диагностика. Това налага в процеса на експлоатация регулярно да се провежда обследване, свързано със спиране от експлоатация на резервоара, изпразване на съда, зачистване и дегазиране до достигане на санитарните норми за работа на хора. След това се предвижда изпълнение на редица задължителни дейности като: обследване на повърхността вън и вътре на всички конструктивни елементи; измерване на реалната дебелина на всички конструктивни елементи на резервоара; измерване на геометрическите характеристики на всички конструктивни елементи от резервоара,

имаци параметри, излизачи извън допустимите граници; определяне на остатъчния ресурс на резервоара; определяне на вида и срока за провеждане на следващо обследване и др.

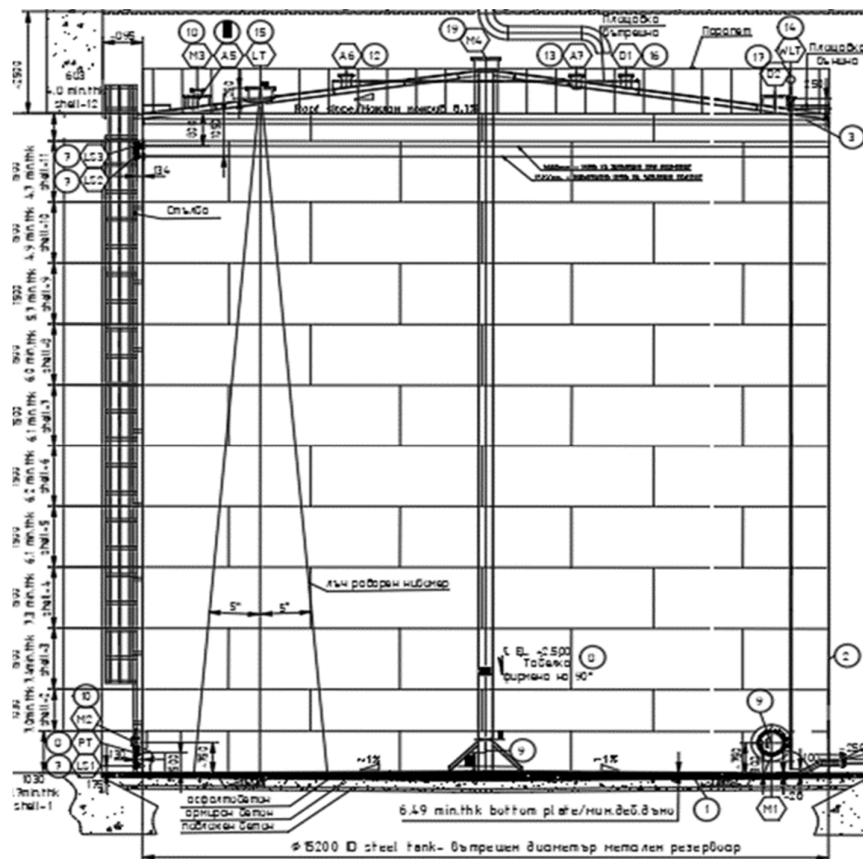
По резултатите от обследването се съставя технически отчет и заключение, което се явява неотменна част от документацията на резервоара. На база на това се предприемат дейности по ремонт и реконструкция на резервоарите с цел повишаване на тяхната безопасност и удължаване на срока за експлоатация. Съвременните методи за експериментално статистическо определяне на остатъчния ресурс са в съответствие със стандарт (РД 26-10-87), използващ вероятностни методи на анализ на надеждността.

При особено тежки или непоправими повреди, когато резервоарът е изчерпал своя ресурс на експлоатация, той трябва да се изведе от експлоатация.

## 2. Обследване състоянието на стоманени вертикални цилиндрични резервоари за съхранение на течни нефтени продукти

### 2.1. Обект на обследване

Обектът на обследване е съществуващ резервоар с обем от  $3000\text{m}^3$  за съхранение на нефтени продукти. Съоръжението е изградено през 90-те години и е проектирано според действащите тогава норми и практики. Проектните размери на резервоара са диаметър  $15,20\text{m}$  и височина  $16,26\text{m}$  (фиг. 1).



Фигура 1. Общ вид на стоманен резервоар  $3000\text{m}^3$

Листовите елементи на дъното са челно заварени в заводски условия с един монтажнен шев, изпълнен с презастъпване. Формата на дъното е конусовидна с наклон от центъра на резервоара към периферията. При монтажа на отделните листови елементи са спазени минималните изисквания за разминаване на презастъпванията. Дъното няма изявена окрайка, изпълнено е само с централна част. Корпусът на резервоара е изпълнен от 12 мантила с различни височини. Монтажът е изпълнен по рулонен метод. При монтажа на листата на мантилите са спазени минималните изисквания за разминаване на шевове. Покривът на резервоара е коничен с централна носеща колона. Изпълнен е от листовка конструкция, която е оребрена пръстеновидно и меридианно чрез П- сечения и ъглови профили.

## 2.2. Последователност на дейностите по обследване на състоянието на резервоара

При обследване на обекта са извършени следните неразрушаващи изпитвания:

1. Обобщен доклад от общ визуален оглед на дъно, покрив, корпус (I-ви и II-ри мантили и достъпните места около стълбите), както и фундамента на резервоара.

Установено е че, външните повърхности на корпус и покрив са видимо в добро състояние. На някои места антикорозионното покритие е нарушено, но няма значителни корозионни увреждания. Вътрешните повърхности на резервоара са в добро състояние – антикорозионното покритие е изпълнено чрез студено поцинковане.

2. Ултразвукова дебелиметрия на корпус.

Поради дългия срок на експлоатация (около 32 години) и наличие на зони на електрохимична корозия на дъното и на Мантили 1 и 2 се налага определяне на действителните им дебелини, според предварителна съставена схема на точките на измерване. На табл. 1 е представен протокол от измерването на дебелините за посочените мантили, като елементи на корпуса, понасящи най-голямо натоварване.

Таблица 1. Протокол от ултразвукова дебелиметрия на корпуса

Материал Material	Дебелина (mm) Thickness	Състояние на повърхността Surface condition	Температура(°C) Temperature	Контактна течност Couplant				
S235JR	-	Гладка	15	Sonotech UT-X				
<b>Технология за провеждане на контрола: БДС EN 14127, ОП 7.1.1.7</b> Procedure								
<b>Използвано ТС: „СТ-Gage DL”, ф. №755013</b> Equipment								
<b>Осезател:</b> Probe								
Тип Type	Честота MHz Frequency	Размер mm Size	Калибрационен блок Calibration block	Метод за измерване Measurement mode				
Двоен, СТ	5	6	ОКБ 1	БДС EN 14127 – Метод 1				
<b>Резултати от контрола/ Examination results</b>								
Мантел №	Точка №	t/mm	Мантел №	Точка №	t/mm	Мантел №	Точка №	t/mm
1	1	7,8	1	12	7,8	2	3	7,8
	2	7,8		13	7,9		4	7,7
	3	7,9		14	7,9		5	7,7
	4	7,9		15	8,0		6	7,9
	5	7,8		16	7,8		7	7,8
	6	7,9		17	7,9		8	7,7
	7	7,8		18	7,7		9	7,8
	8	7,9		19	7,7		10	8,0
	9	7,7		20	7,8		11	8,0
	10	7,8		2	1		7,9	12
11	7,9	2	8,0		13	7,8		

### 3. Радиографичен контрол.

Чрез радиографичен контрол (табл.2) се цели обследване състоянието на следните заваръчни шевове:

- вертикални заварени съединения на I-ви мантел (по 1бр. радиограма на всяко заварено съединение);
- Т-образни заварени съединения между I-ви и II-ри мантели – 100%;
- хоризонтални шевове I-ви и II-ри мантели – по 1 бр. радиограма на всеки 3м;
- затварящ шев – 2 л.м (от кота „0“ нагоре).

Общото визуално заключение за заварените съединения показва, че всички те са в добро състояние с изключение на монтажните шевове по дъното и шевовете дъно-корпус, които са неравномерни и недозапълнени. В основния метал и заварените съединения не се наблюдават значителни драскотини, няма пукнатини, прогаряния, непровари и разслоения.

Таблица 2. Протокол от Радиографичен контрол

Ниво на качество: БДС EN ISO 5817:2014 – ниво „С“																							
Quality level																							
Радиографична технология: БДС EN ISO 17636-1:2013 – техн. „А“, ОП 7.1.1.1																							
Radiographic technique																							
Използвано ТС: Гамарид №2519																							
Equipment																							
Схема на пролъчване Type of Exposure			Източник на лъчение Radiation source		Активност Activity [Ci]		12,5		Напрежение Voltage [kV]		-												
			γ,Se75		R <sub>0</sub>		Фокусно петно Spot size(mm)		3.0		Ток Current [mA]												
			X			-		-		-		-											
			Филмова система Film system			Филм Film		FOMA R7		Химико-фотографска обработка Film processing		Ръчно Manual		-									
			C3			C4	C5	Екран Screen		Pb 0,027		Автоматично Automatic		X									
			Фокусно разстояние Source-to-film distance [mm]			500		Време за експонация Exposure time [min]		номограма													
			Чувствителност W IQI Sensitivity			13		Оптическа плътност D Density		2.0													
Ниво на приемане : БДС EN ISO 10675-1:2017 – ниво „2“																							
Acceptance criteria																							
Резултати от изпитването/ Examination Results																							
No	№ на З.С. Weld No	Сектор Sector /dm/	δ mm ТНК	W	D	Обозначение на несъвършенства: Classification of imperfections															DA Yes	NE No	Забележка Note
						БДС EN ISO 6520-1																	
						2011	2016	2014	2013	2015	301	3011	304	401	515	402	101	102	103	504			
	Aa	Ab	Ac	Ad	Ae	Ba	Bb	Bc	C	Da	Db	Dc	Ea	Eb	Ec	Fa	Fc						
1.	М.Ш.	0-2	8	13	2.0														X				
2.		2-4	"	"	"														X				
3.		4-6	"	"	"														X				
4.		6-8	"	"	"														X				
5.		8-10	"	"	"														X				
6.		10-12	"	"	"														X				
Aa	Пора сферондна Gas-pore	Ad	Пори групирани Clustred porosity	Bb	Шлака дълга Slag inclusion-linear	Da	Непровар закръглен Root concavity	Ea	Пукнатина осова Longitudinal crack	Fa	Проклаване голямо Excess penetration												
Ab	Пора канална worm-hole	Ae	Пора продълговата Elongated cavity	Bc	Включване метално Metallic inclusion	Db	Непровар ръбест Lack of penetration	Eb	Пукнатина напречна Transverse cracks	Fc	Подрез Undercut												
Ac	Пори верижни Linear porosity	Ba	Шлака юкса Slag inclusion-isolated	C	Недозавареност Lack of fusion	Dc	Непровар вътрешен Lack of penetration	Ec	Пукнатина радиална Radial cracks														

### 4. Спектрален анализ на стоманата на корпус(мантели 1 и 2), дъно и покрив.

За оценка механичните характеристики на материалите на основните възли се извърши спектрален анализ за установяване на действителния химически състав, представен на табл. 3

Таблица 3. Протокол от Спектрален анализ

Използвано ТС: Equipment Преносим спектрометър WAS, серия PM		Метод за изпитване: Method of examination Спектрален анализ							
Резултати от изпитването/ Examination Results									
Резервоар Tank	Секция Section	Елементи/Elements							Материал/Material
		C%	SI%	Mn%	Cr %	Ni %	Cu%		
531	Мантел 1	0,078	0,021	0,357	0,014	0,022	0,073		S235JR
		0,080	0,030	0,400	0,021	0,028	0,073		S235JR
	Мантел 2	0,091	0,035	0,358	0,017	0,024	0,074		S235JR
		0,082	0,042	0,430	0,030	0,032	0,070		S235JR
531	Покрив	0,094	0,056	0,358	0,019	0,025	0,074		S235JR
		0,098	0,062	0,363	0,023	0,032	0,077		S235JR
		0,096	0,058	0,360	0,020	0,028	0,078		S235JR
		0,098	0,057	0,361	0,020	0,030	0,076		S235JR
531	Дъно	0,143	0,094	0,450	0,089	0,052	0,034		S235JR
		0,148	0,097	0,456	0,092	0,055	0,037		S235JR
		0,151	0,098	0,454	0,090	0,057	0,038		S235JR
		0,145	0,097	0,450	0,091	0,054	0,034		S235JR

### 3. Оценка на остатъчния ресурс на резервоара

Определянето на остатъчния ресурс на резервоара зависи до голяма степен от износването на най-натоварения елемент от корпуса в случая мантел 1. Оценка на надеждността на химическото и нефтеното оборудване при повърхностно разрушаване се извършва съгласно действащ стандарт РД 26-10-87.

Изборът на минималния брой измервания се извършва съгласно табл. 4, за което задаваме максимално допустимата относителна грешка  $\delta = 0,10$  и доверителна вероятност на оценката  $\gamma = 0,95$ . Коефициентът на вариация  $v_h$  в съответствие с точка 2.2.2 от стандарта се приема 0,2 и според табл.4 определяме  $N = 13$ .

Таблица 4. Избор на минимален брой N точки за измерване

$\delta$	$\gamma$	N при $v_h$						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
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

На табл. 5 са дадени измерените дебелини в 13 характерни точки(според N) от Мантел 1 и съответно дълбочините на разрушаване за всяка точка. Резултатите са от табл.1 – равномерно разпределени по сечението на мантела. Важно е да се отчете, че при проектирането резервоари стандартът поставя конструктивни изисквания за

дебелината на стената на мантелите от минимум 6мм, а изпълнимата дебелина на Мантел 1 при изработка на резервоара е 9 мм.

Таблица 5. Дебелини и дълбочини на разрушаване за Мантел 1

Мантел 1 т. №	Изпълнима дебелина, mm	Измерена дебелина, mm	Дълбочина на разрушаване h <sub>i</sub> , mm
1	9,0	7,8	1.2
2	9,0	7,9	1.1
3	9,0	7,5	1.5
4	9,0	7,6	1.4
5	9,0	7,9	1.1
6	9,0	7,7	1.3
7	9,0	7,6	1.4
8	9,0	7,4	1.6
9	9,0	7,8	1.2
10	9,0	8,0	1.0
11	9,0	7,4	1,6
12	9,0	7,5	1,5
13	9,0	7,8	1.2

Използвайки формула (1), на посочения по-горе стандарт, определяме средната дълбочина на разрушаване:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N} = 1,315 \text{ mm} \quad (1)$$

От формула (2), определяме средно квадратичното отклонение на дълбочините на разрушаване:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum (h_i - \bar{h})^2}{N-1}} = 0,199 \text{ mm} \quad (2)$$

По формула (3), определяме коефициента на вариация:

$$v_k = \frac{\sigma_k}{\bar{h}} \quad (3)$$

$$v_h = 0,199 / 1,315 = 0,152 < 0,2$$

Тъй като получената стойност 0,538 на коефициента на вариация  $v_h$  е по-малка от избраната (0,2), не се изискват допълнителни измервания (съгл. т.2.2.5 от стандарта).

В табл. 6 според разпределението на Вейбул, използвайки интерполация, определяме параметъра на формата на разпределението на дълбочината на разрушаване  $b = 6,0$  и коефициента  $K_b = 0,928$ , чрез който изчисляваме параметъра на мащаба  $a$  ;

Таблица 6. Връзка между параметрите  $b$ ,  $K_b$  и  $v$  от разпределението на Вейбул

$b$	$K_b$	$v$
7,9	0,939	0,152

Изчислява се параметъра на мащаба  $a$ :

$$a = \bar{h} / K_b \quad (4)$$

$$a = 1,315/0,939 = 1,4\text{mm}$$

За определяне максималната дълбочина на разрушаване се изчислява индикаторът на мащаба:

$$M = \frac{S}{S_0} = \frac{15,66}{0,5 \cdot 10^{-4}} = 31,3 \cdot 10^4 \quad (5)$$

където  $S_0$  е повърхността на едно независимо измерване на дебеломера, а  $S$  е площта на мантел 1.

$$S_0 = 0,5 \text{ cm}^2 = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

$$S = \pi \cdot D \cdot H_1 = \pi \cdot 15,2 \cdot 1,03 = 15,66 \text{ m}^2$$

Максималната дълбочина на разрушаване  $h_{max}$  на повърхността на Мантел 1 при избрана доверителна вероятност  $\gamma = 0,95$  се изчислява съгласно формулата (6):

$$h_{max} = a \left[ -\ln \left( -\frac{\ln \gamma}{M} \right) \right]^{\frac{1}{b}} \quad (6)$$

$$h_{max} = 1,4 \cdot (-\ln(-\ln(0,95)/313000))^{(1/7,9)} = 1,98\text{mm}$$

Получената гранична стойност е по-висока от максимално измерената дълбочина на разрушаване.

Определяне на установеното безотказно време на работа  $T_{0y}$  се определя по формулата (7) при известен начален срок на експлоатация  $T_0 = 32$  год.:

$$T_{0y} = T_0 \cdot (1 - 3 \cdot v_m) \quad (7)$$

$$T_{0y} = 32 \cdot (1 - 3 \cdot 0,042) = 27,9 \text{ години},$$

където коефициентът на вариация на ресурса е определен по (8):

$$v_m = \frac{v_h}{\sqrt{N}} = 0,152 / \sqrt{13} = 0,042 \quad (8)$$

## 5. Изводи

Получените резултати за дебелините чрез безразрушителен контрол и представената методика позволяват да се направи статистическа оценка на показателите на надеждността (среден и зададен експлоатационен живот, средно и зададено време за работа без откази), от което да се установи оставащия експлоатационен ресурс на резервоара. При по-голяма неравномерност на

корозионното разрушаване от избраната може да възникне разрушаване на изследваните елементи от обекта преди да настъпи граничното му състояние.

Измерените минимални дебелини са достатъчни за поемане на хидростатичните товари при експлоатацията на резервоара при условие, че геометрията на резервоара не е в разрез с изискванията на стандарт EN14015, а максималното ниво на запълване е 15,8m и обемното тегло на съхранявания продукт не надвишава 1,01/m<sup>3</sup>.

## References

1. Марков А. А., Д. А. Шпагин. Ультразвуковая дефектоскопия рельсов, С. П., Образование культура, 230, 1999
2. Скордев А., М. Миховски. Методи за безразрушителен контрол, Техника, С, 1988
3. Томашов Н.Д., Г.П. Чернова. Теория корозии и корозионно-стойкие сплавы. М., Металургия, 1986
4. Chen C. H. and Sin S. K. Interactive Ultrasonic Nondestructive Evaluation, U.S. Army Materials Technology Laboratory, 1988
5. Jablonski J. et al. Critical flaw estimate and flaw analysis of 81-mm M821A1 mortar projectile, Technical Report ARMET-TR10001, Picatinny Arsenal, NJ 07806-5000, 2010.
6. Strutt J. E., J. R. Nicholls and B. Barbier. The prediction of corrosion by statistical analysis of corrosion profiles, (Corrosion science, 1985, Volume 25, No. 5, p. 305 – 316).