



Получена: 11.03.2022 г.

Приета: 07.04.2022 г.

ВЛИЯНИЕ НА ПОКРИВНАТА КОНСТРУКЦИЯ ВЪРХУ УСИЛИЯТА В ГОРНИЯ ОПОРЕН ПРЪСТЕН ПРИ НАТОВАРВАНЕ ОТ ВЯТЪР

Л. Здравков¹

Ключови думи: вятър, усилие, горен опорен пръстен, покривна конструкция

РЕЗЮМЕ

При определяне на необходимото сечение на горния опорен пръстен (ГОП) на резервоар с фиксиран покрив, в стандарти BS 2654:1989, EN 14015:2004, EN 1993-4-2:2007 и API650, 12th Edition, са посочени еднотипни формули. В тях не се отчита натоварването от вятър по корпуса и влиянието на покривната конструкция. Наистина ли те могат да бъдат пренебрегнати? Използвайки пространствените модели на пет реално проектирани и намиращи се в експлоатация стоманени резервоари, авторът е намерил отговори на тези въпроси.

1. Въведение

При определяне на необходимото сечение на горния опорен пръстен (ГОП) на резервоар с фиксиран покрив, според стандарти BS 2654:1989 [1] и EN 14015:2004 [2] трябва да се използва формулата:

$$A \geq \frac{50 p_c r^2}{S_c \operatorname{tg}(\theta)}, \quad (1)$$

където A е необходимата площ на ГОП, mm^2 ;

¹ Любомир Здравков, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg

p_c – вътрешното налягане, което е равно на изчислителната стойност на свръхналягането, от която е извадено теглото на листовите в покривната обшивка, mbaг ;

$r = D/2$ – радиусът на корпуса на резервоара, m ;

$S_c = 120 \text{ MPa}$ – допустимата стойност на натисковото напрежение за всички класове стомана;

θ – ъгълът между покривната обшивка и хоризонталната равнина в мястото на снаждането ѝ с корпуса.

Освен това сечението на ГОП следва да бъде проверено за опънните усилия в него, дължащи се на външни товари и/или подналягане в резервоара.

Формулата за определяне на необходимото сечение на ГОП в стандарт EN 1993-4-2:2007 [3] има вида:

$$A \geq \frac{P_{v,Ed} r^2}{2f_{y,d} \text{tg}(\theta)}, \quad (2)$$

където $p_{v,Ed}$ е максималната стойност на вертикалната компонента на изчислителния разпределен товар, в който е включено теглото на покривната конструкция;

$f_{y,d}$ – изчислителната стойност на границата на провлачане на стоманата. Определя се по израза:

$$f_{y,d} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (2)$$

в който f_y е характеристичната стойност на границата на провлачане на стоманата;

γ_{M0} – коефициент на сигурност по материал.

В стандарт API650, 12th Edition [4], при определяне на необходимото сечение на ГОП трябва да се използва израза:

$$A \geq \frac{pD^2}{8F_a \text{tg}(\theta)}, \quad (4)$$

където p е най-голямата по стойност комбинация на товарите, действащи отгоре надолу;

D – диаметърът на корпуса на резервоара;

F_a – най-малкото допустимо опънно напрежение на материалите, които изграждат горния опорен пръстен на корпуса на резервоара. Изчислява се чрез израза:

$$F_a = 0,6f_y. \quad (5)$$

След сравнение на формулите, записани по-горе, може да се направят следните изводи:

- а) те имат еднаква структура, което не е учудващо предвид водещата в световен мащаб роля на американските стандарти за проектиране на петролни съоръжения и всеобщото взаимстване от тях;
- б) в тях не се отчита влиянието на покривната конструкция;
- в) във всички формули не се отчита натоварването от вятър по корпуса.

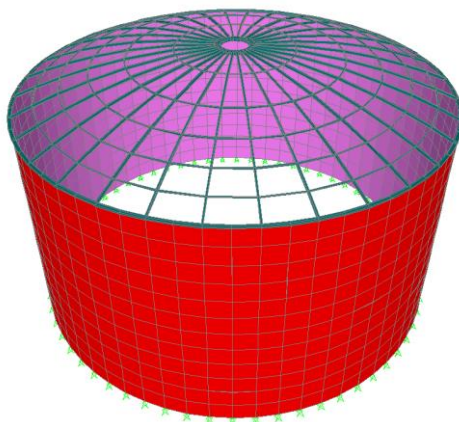
Може да се добави още, че в цитираните стандарти [1 – 4] единствено се търси минимално необходимото сечение на ГОП. Други геометрични характеристики, като инерционен и/или съпротивителен момент, са negliжирани. Затова авторът се е запитал доколко това приемане е достоверно. И наистина ли покривната конструкция не оказва влияние върху усилията в ГОП? В настоящата статия той ще намери отговор на въпросите си.

2. Изследване

За да намери отговор на зададените по-горе въпроси, авторът е провел числено изследване на пет реално проектирани и изпълнени стоманени вертикални цилиндрични резервоари, чиито основни размери са показани в табл. 1. С помощта на програма за пространствен анализ са моделирани техните корпус, горен опорен пръстен и покривна конструкция. Корпусът е моделиран чрез множество равнинни (shell) елементи, а покривната конструкция и ГОП – чрез прътови (frame) елементи, вж. фиг. 1. Радиалните ребра са свързани ставно с ГОП. Покривната обшивка на изследваните резервоари не е заварена към конструкцията и затова тя не е моделирана.

Таблица 1. Геометрични размери на изследваните резервоари

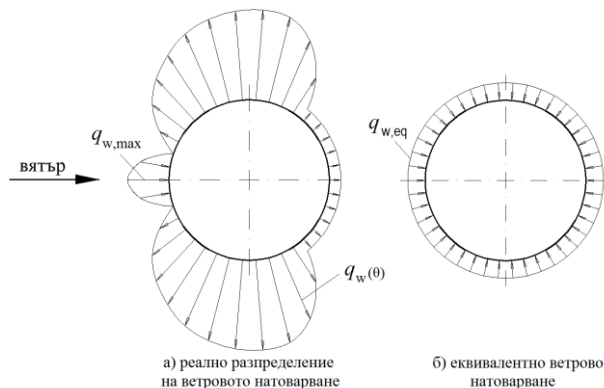
Резервоар №	1	2	3	4	5
Местоположение	Чехия	България	Ла Реюнион	Нидерландия	Белгия
Обем, m ³	500	5 000	15 000	25 000	40 000
Диаметър D , mm	7 200	22 800	36 000	41 500	40 000
Височина H , mm	12 995	11 940	14 400	20 000	32 000
Дебелина t_s , mm	5	5	9	8	10
Вид покрив	коничен	сферичен	сферичен	сферичен	сферичен
Наклон в ГОП, °	11°	24,025°	24,12°	21,82°	22,62°
Сечение на ГОП	UPN140	UPN180	- 28×500	- 20×700	- 25×460
Брой радиални ребра	12	32	48	52	56
Сечение на ребрата	IPN100	IPN140	IPN200	IPE240	IPE240



Фиг. 1. Изчислителен модел на стоманен вертикален цилиндричен резервоар

Всички елементи на резервоарите са изградени от стомана S235, имаща физико-механични характеристики съгласно стандарт EN 10025-2:2004 [5].

И петте резервоара са проектирани за вятър със скорост $v = 45 \text{ m/s}$. За разлика от изследванията на *Zeybek* [6 – 7], тук неравномерното в план налягане от вятър по цилиндричните корпуси е заменено с еквивалентно равномерно разпределено натоварване $q_{w,eq}$, вж. фиг. 2.



Фиг. 2. Ветрово натоварване върху корпуса на резервоара

Стойността на условното равномерно ветрово натоварване се изчислява по формулата:

$$q_{w,eq} = k_w q_{w,max} , \quad (6)$$

в която, според стандарт EN 1993-4-2:2007 [3]:

$$k_w = \frac{1}{C_w} , \quad (7)$$

където за C_w се определя от:

$$C_w = \frac{2,2}{1 + 0,1 \sqrt{C_b \frac{r}{l} \sqrt{\frac{r}{t_s}}}} \geq 1,0, \quad (8)$$

където t_s е най-малката дебелина на пояс в разглеждания участък на корпуса, между укрепяващите го пръстени;

l – разстоянието между укрепяващите корпуса пръстени;

$C_b = 1,0$ – при резервоари с постоянни покриви, както и при отворени отгоре резервоари, но с корав горен опорен простен.

Съгласно стандарт EN 1993-1-6:2007 [8] коефициентът k_w следва да се намира в границите $0,65 \leq k_w \leq 1,0$.

Максималната стойност на ветровото натоварване по корпуса $q_{w,max}$, вж. фиг. 2, е определена чрез израза:

$$q_{w,max} = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} 1,25 \cdot 45^2 = 1265,6 \text{ N/m}^2, \quad (9)$$

където $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ е плътността на въздуха според EN 1991-1-4 [9];
 $v = 45 \text{ m/s}$ – изчислителната скорост на вятъра.

В референтния европейски стандарт за ветрово натоварване EN 1991-1-4 [9] няма методика за определяне на еквивалентното равномерно въздействие от вятър. Поради тази причина авторът е възприел посочената в API650, 12th Edition [4] формула:

$$q_{w,r,eq} = 1,44 \left(\frac{3,6v}{190} \right)^2 = 1,44 \left(\frac{3,6 \cdot 45}{190} \right)^2 = 1,046 \text{ kN/m}^2, \quad (10)$$

където $3,6v$ е изчислителната скорост на ветровия поток в km/h .

Чрез $q_{w,r,eq}$ може да се определят опънните сили R в равнината на покривната обшивка в мястото на снаждането ѝ с корпуса, породени от смученето от вятър по покривната обшивка:

$$R = q_{w,r,eq} \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{\pi D} \frac{1}{\sin(\theta)} = q_{w,r,eq} \frac{D}{4 \sin(\theta)}. \quad (11)$$

Оттук, хоризонталната компонента на опорната реакция в ГОП ще бъде:

$$R_h = R \cos(\theta) = q_{w,r,eq} \frac{D}{4 \text{tg}(\theta)}. \quad (12)$$

Осовото усилие в ГОП ще се определи чрез израза:

$$N_{Ed} = \frac{R_h D}{2} = q_{w,r,eq} \frac{D^2}{8 \text{tg}(\theta)}, \quad (13)$$

откъдето става ясен произходът на формули (1), (2) и (4).

Освен за ветрово въздействие, петте резервоара са изследвани за натоварване от собствено тегло на елементите, сняг по покрива и подналягане. Товарната комбинация има вида:

$$q_1 = \begin{cases} (g_{r,pl} + g_{r,str}) \gamma_{G,sup} + s \gamma_Q + \psi_0 P_v \gamma_Q \\ (g_{r,pl} + g_{r,str}) \gamma_{G,sup} + P_v \gamma_Q + \psi_0 s \gamma_Q \end{cases}, \quad (14)$$

където $g_{r,pl}$ е характеристикната стойност за натоварване от собственото тегло на покривната обшивка;

$g_{r,str}$ е характеристикната стойност за натоварване от собственото тегло на покривната конструкция;

s – характеристикната стойност на натоварването от сняг по покрива на резервоара;

P_v – характеристикната стойност на подналягането (вакуума) в резервоара;

$\gamma_{G,sup} = 1,35$ – коефициент за натоварване от собствено тегло покривна конструкция и обшивка, когато този товар действа неблагоприятно;

$\gamma_Q = 1,5$ – коефициент за натоварване от временни товари;

$\psi_0 = 0,6$ – коефициент за съчетание на временни въздействия.

Горният опорен пръстен на резервоарите е със сечение, каквото е показано в табл. 1. В процеса на изследването, в изчислителните модели ГОП са поставяни един път хоризонтално, с голяма огъвна коравина в хоризонталната равнина, и втори път – вертикално, с най-малка огъвна коравина в хоризонталната равнина.

3. Резултати

Резултатите от проведеното изследване в kN и kN.m, са както следва:

Резервоар № 1 с обем $V = 500 \text{ m}^3$

$C_w = 1,7287$;

$k_w = 0,65$;

$q_{w,eq} = 0,822 \text{ kPa}$;

$R_h = 9,686 \text{ kN/m}$.

Усилия при хоризонтално поставен профил UPN140				
Елемент	Усилие от:	N_{Ed}	$M_{Ed,o}$	$M_{Ed,m}$
ГОП	вятър по корпуса	-0,3821	-0,0033	0,00166
	вятър по покрива	-21,452	-0,3015	-0,0213
ребро	вятър по корпуса	-0,021		-0,0034
	вятър по покрива	-1,201		-0,1909
	комбинация $q_1 \downarrow$	-25,164		2,261

Усилия при вертикално поставен профил UPN140				
Елемент	Усилие от:	N_{Ed}	$M_{Ed,o}$	$M_{Ed,m}$
ГОП	вятър по корпуса	-0,386	-0,0028	0,001403
	вятър по покрива	-21,652	-0,2723	-0,0359
ребро	вятър по корпуса	-0,01848		-0,0029
	вятър по покрива	-1,0363		-0,1647
	комбинация $q_1 \downarrow$	-21,987		2,77

При изчисление съгласно формула (13), усилието в ГОП от ветрово въздействие по покрива е със стойност $N_{Ed} = -34,936 \text{ kN}$.

Огъващият момент $M_{Ed,o}$ е отчитан в ГОП в мястото на снаждане с радиалните ребра.

Огъващият момент $M_{Ed,m}$ е отчитан:

- в ГОП, в средата между снаждането с радиалните ребра;
- в най-близкото до ГОП поле от радиалните ребра.

Отчетените в радиалните ребра осови усилия N_{Ed} и огъващи моменти $M_{Ed,m}$ се отнасят за най-близко разположените до ГОП елементи.

Резервоар № 2 с обем $V = 5\,000\text{ m}^3$

$C_w = 1,313;$

$k_w = 0,762;$

$q_{w,eq} = 0,963\text{ kPa};$

$R_h = 13,376\text{ kN/m}.$

Усилия при хоризонтално поставен профил UPN180				
Елемент	Усилие от:	N_{Ed}	$M_{Ed,o}$	$M_{Ed,m}$
ГОП	вятър по корпуса	-2,005	-0,0051	0,0029
	вятър по покрива	-92,898	-1,7	0,5445
ребро	вятър по корпуса	-0,024		-0,018
	вятър по покрива	-2,017		-1,039
	комбинация $q_1 \downarrow$	-89,361		4,4122

Усилия при вертикално поставен профил UPN180				
Елемент	Усилие от:	N_{Ed}	$M_{Ed,o}$	$M_{Ed,m}$
ГОП	вятър по корпуса	-2,029	-0,004	0,0038
	вятър по покрива	-92,82	-1,6778	0,551
ребро	вятър по корпуса	-0,025		-0,0174
	вятър по покрива	-1,887		-0,9722
	комбинация $q_1 \downarrow$	-84,762		6,6878

При изчисление съгласно формула (13), усилието в ГОП от ветрово въздействие по покрива е със стойност $N_{Ed} = -152,48\text{ kN}$.

Резервоар №3 с обем $V = 15\,000\text{ m}^3$

$C_w = 1,259;$

$k_w = 0,794;$

$q_{w,eq} = 1,005\text{ kPa};$

$R_h = 21,026\text{ kN/m}.$

Елемент	Усилие от:	N_{Ed}	$M_{Ed,o}$	$M_{Ed,m}$
ГОП	вятър по корпуса	-4,03	-0,00644	0,0064
	вятър по покрива	-279,2	-2,88	0,96
ребро	вятър по корпуса	-0,0406		-0,0211
	вятър по покрива	-2,81		-1,46
	комбинация $q_1 \downarrow$	-155,17		4,526

Усилия при вертикално поставена плоча – 28×500				
Елемент	Усилие от:	N_{Ed}	$M_{Ed,o}$	$M_{Ed,m}$
ГОП	вятър по корпуса	-4,321	-0,0046	0,0046
	вятър по покрива	-278,573	-2,132	0,848
ребро	вятър по корпуса	-0,0346		-0,0179
	вятър по покрива	-2,229		-1,156
	комбинация $q_1 \downarrow$	-129,32		18,0381

При изчисление съгласно формула (13), усилието в ГОП от ветрово въздействие по покрива е със стойност $N_{Ed} = -378,46\text{ kN}$.

Резервоар № 4 с обем $V = 25\,000\text{ m}^3$

$C_w = 1,274;$

$k_w = 0,785;$

$q_{w,eq} = 0,993\text{ kPa};$

$R_h = 27,105\text{ kN/m}.$

Усилия при хоризонтално поставена плоча – 20×700				
Елемент	Усилие от:	N_{Ed}	$M_{Ed,o}$	$M_{Ed,m}$
ГОП	вятър по корпуса	-7,809	-0,352	0,1793
	вятър по покрива	-421,46	-14,164	6,913
ребро	вятър по корпуса	-0,12		-0,0608
	вятър по покрива	-5,889		-2,993
	комбинация $q_1 \downarrow$	-203,037		11,117

Усилия при вертикално поставена плоча – 20×700				
Елемент	Усилие от:	N_{Ed}	$M_{Ed,o}$	$M_{Ed,m}$
ГОП	вятър по корпуса	-7,393	-0,0532	0,1065
	вятър по покрива	-359,21	-3,28	4,196
ребро	вятър по корпуса	-0,1151		-0,0585
	вятър по покрива	-5,155		-2,6205
	комбинация $q_1 \downarrow$	-203,23		11,01

При изчисления съгласно формула (13), усилието в ГОП от ветрово въздействие по покрива е със стойност $N_{Ed} = -562,43\text{ kN}$.

Резервоар № 5 с обем $V = 40\,000\text{ m}^3$

$C_w = 1,439;$

$k_w = 0,695;$

$q_{w,eq} = 0,879\text{ kPa};$

$R_h = 25,104\text{ kN/m}.$

Усилия при хоризонтално поставена плоча – 25×460				
Елемент	Усилие от:	N_{Ed}	$M_{Ed,o}$	$M_{Ed,m}$
ГОП	вятър по корпуса	-5,51	-0,0125	0,0125
	вятър по покрива	-355,58	-3,439	1,004
ребро	вятър по корпуса	-0,083		-0,0392
	вятър по покрива	-5,334		-2,531
	комбинация $q_1 \downarrow$	-158,99		9,856

Усилия при вертикално поставена плоча – 25×460				
Елемент	Усилие от:	N_{Ed}	$M_{Ed,o}$	$M_{Ed,m}$
ГОП	вятър по корпуса	-5,976	-0,0089	0,0089
	вятър по покрива	-358,636	-3,166	1,041
ребро	вятър по корпуса	-0,0696		-0,0331
	вятър по покрива	-4,18		-1,983
	комбинация $q_1 \downarrow$	-131,97		22,84

При изчисления съгласно формула (13), усилието в ГОП от ветрово въздействие по покрива е със стойност $N_{Ed} = -500,156\text{ kN}$.

4. Заключение

От направеното изследване могат да се направят следните изводи:

- а) усилията в горния опорен пръстен, породени от ветровото натоварване по цилиндричния корпус, са малки и могат да се пренебрегнат;
- б) наличието на покривна конструкция намалява стойностите на разрезните усилия в ГОП, като при малките резервоари разликата може да надвиши 60%;
- в) с едно изключение, изменението на инерционните моменти при запазване на сечението на ГОП води до много малки промени в стойностите на разрезните усилия в него;
- г) намаляването на инерционните моменти на ГОП при запазване на сечението им води до по-малки осови усилия в радиалните ребра, но по-големи огъващи моменти в тях. От гледна точка на постигане на по-лека покривна конструкция е удачно сечението на ГОП да има голяма огъвна коравина в хоризонталната равнина.

ЛИТЕРАТУРА

1. BS 2654:1989. Manufacture of vertical steel welded non-refrigerated storage tanks with but – welded shells for the petroleum industry.
2. EN 14015:2004. Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above. CEN, November 2004.
3. EN 1993-4-2:2007. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 4-2: Tanks. CEN, 2007.
4. API Std 650. Welded Steel Tanks for Oil Storage, Twelfth Edition, Addendum 3. American Petroleum Institute, Washington. August 2018.
5. EN 10025-2:2004. Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels. November 2004.
6. Zeybek, Ö. Design of cylindrical steel liquid tanks with stepped walls using One-foot method. // Challenge Journal of Structural Mechanics, 2021, 7 (4): 162 – 169.
7. Zeybek, Ö. The stability of anchored cylindrical steel tanks with a secondary stiffening ring. // International Journal of Pressure Vessels and Piping, 31 March 2022, 104661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104661>
8. EN 1993-1-6:2007. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures. CEN, Brussels, 2007.
9. EN 1991-1-4:2005. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General actions – Wind actions. CEN, Brussels, 2005.

INFLUENCE OF THE ROOF STRUCTURE ON THE FORCES IN THE TOP ANGLE UNDER WIND LOADING

L. Zdravkov¹

Keywords: wind, force, top angle, roof structure

ABSTRACT

When determining the required cross-section of the top angle of a fixed roof tank, standards BS 2654:1989, EN 14015:2004, EN 1993-4-2:2007 and API650, 12th Edition, specify the same type of formulas. They do not take into account the wind load on the cylindrical shell and the influence of the roof structure. Can they really be ignored? Using the spatial models of five really designed and in service steel tanks, the author has found answers to these questions.

¹ Lyubomir Zdravkov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Steel, Timber and Plastic Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg