



Получена: 07.05.2021 г.

Приета: 17.05.2021 г.

НАТОВАРВАНЕ ОТ ВЯТЪР ПО ПОКРИВИ НА КРЪГЛА ОСНОВА

Л. Здравков¹

Ключови думи: вертикален резервоар, коничен и сферичен покрив, ветрово налягане, числени методи

РЕЗЮМЕ

Поради смяна на съхранявания продукт условията на експлоатация на резервоар с обем 2000 m³ и несамоносещ коничен покрив ще бъдат променени. Това налага той да бъде проверен за достатъчна носеща способност. Част от проверките включват изследване за цялостно преместване при празен резервоар, натоварен от вятър и свръхналягане в него. Когато коничния покрив е обтичан от ветрови поток, това води до поява на сили, действащи отдолу нагоре, което, съчетано със свръхналягането, може да доведе до цялостно повдигане на съоръжението.

Разглежданият тук коничен покрив е извън обхвата на приложение на стандарти БДС EN 1991-1-4 или Наредба № 3 от 2004 г. Това е принудило автора да постъпи по следния начин:

- а) да потърси други стандарти, в които е разгледано натоварването от вятър по конични покриви и да сравни получените резултати;
- б) да създаде компютърни модели на обтичания от въздушен поток резервоар, имащ два вида покриви – коничен и сферичен. Чрез тях той се е опитал да определи:
 - стойностите на налягането от вятър по двата вида покриви;
 - голяма ли е разликата в натоварването от вятър по сферични и конични покриви.

От извършеното числено моделиране и анализ на резервоарите е установено, че налягането от вятър е различно при коничните и сферичните покриви, дори те да имат еднаква стрелка.

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

1. Въведение

Съхраняваният продукт в резервоар с обем 2000 m^3 и несамоносещ коничен покрив ще бъде променен от нефт в концентрирана сярна киселина. Тъй като това ще доведе до промяна в условията на експлоатация, а и съоръжението е проектирано и построено в края на миналия век, по тогава действащите норми, това налага то да бъде проверено за достатъчна носеща способност. Част от проверките включват изследване за цялостно преместване при празен резервоар, натоварен от вятър и свръхналягане в него.

Когато коничният покрив на резервоара е обтичан от ветрови поток, това води до поява на сили, действащи отдолу нагоре, които, съчетани със свръхналягането, могат да доведат до цялостно повдигане на съоръжението. Действащите по покрива ветрови сили могат да бъдат определени според БДС EN 1991-1-4 [1] или Наредба №3 от 2004 г. [2], но посочените в тези документи методики имат своите ограничения:

- а) според БДС EN 1991-1-4 покривът следва да е сферичен;
- б) според Наредба № 3 покривът може да е сферичен или коничен, но последният е ограничен до максимален ъгъл на наклона $\alpha \leq 5^\circ$.

Тъй като при разглеждания резервоар с обем 2000 m^3 покривът е несамоносещ коничен, но с наклон $\alpha = 7,13^\circ > 5^\circ$, той е извън обхвата на разгледаните по-горе нормативни документи. Това е накарало автора да постъпи по следния начин:

- а) да потърси други стандарти, в които е разгледано натоварването от вятър по конични покриви и да сравни получените резултати;
- б) да създаде компютърни модели на обтичания от въздушен поток резервоар, имащ два вида покриви – коничен и сферичен. Чрез тях са определени:
 - стойностите на налягането от вятър по двата вида покриви;
 - голяма ли е разликата в натоварването от вятър по сферични и конични покриви.

2. Аналитично определяне на ветровото натоварване по покрива

Използвайки дадената в стандарт БДС EN 1991-1-4 [1] методика, авторът е определил скоростния напор на вятъра $q_p(z)$ при следните предпоставки:

- а) базова скорост на вятъра на височина 10 m над нивото на терена – $v_b = 33 \text{ m/s}$;
- б) категория на терена – III;
- в) изчислителни височини z_e над нивото на терена:
 - снаждането на корпуса с покрива, т.е. точки „А“ и „С“, вж. фиг. 1 – $z_e = 12,4 \text{ m}$;
 - най-високата точка от покрива, т.е. точка „В“, вж. фиг. 1 – $z_e = 13,35 \text{ m}$;
 - по средата между точки „А“ и „В“, респективно „В“ и „С“ – $z_e = 12,875 \text{ m}$.

Ветровото налягане w_e , въздействащо по външни повърхности на строителни конструкции, е определено по формулата:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}, \quad (1)$$

където z_e е изчислителната височина на външната повърхност над нивото на терена;

$q_p(z_e)$ – стойността на налягането на ветровия поток на височина z_e ;

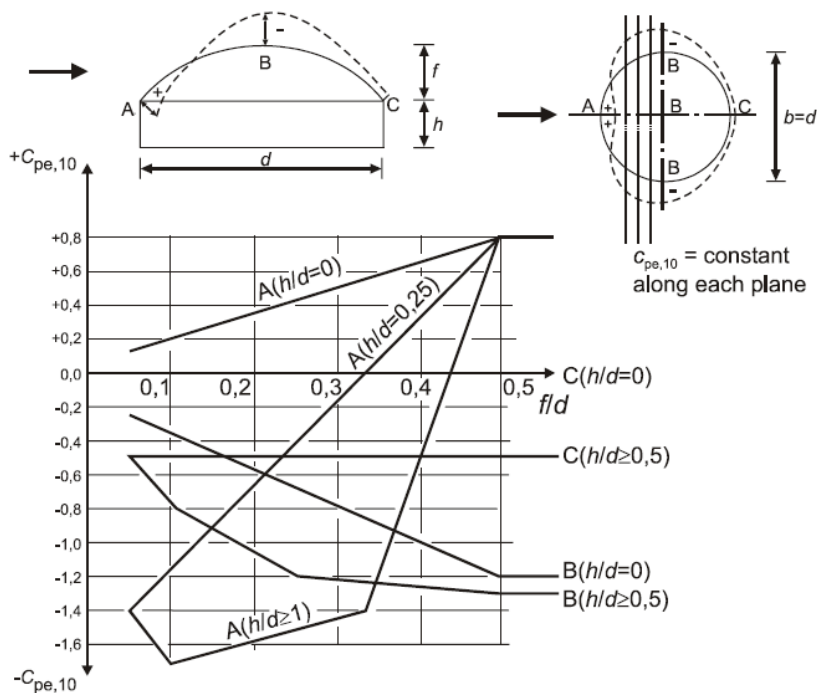
c_{pe} – аеродинамичен коефициент при обтичане на повърхности от ветрови поток.

Освен все още действащите паралелно в България стандарти БДС EN 1991-1-4 [1] и Наредба № 3 [2], авторът е успял да намери няколко чужди нормативни документа, отнасящи се за натоварването от вятър по строителни конструкции. От тях авторът е отчетел стойностите на аеродинамичните коефициенти c_{pe} , чрез които е изчислил стойностите на ветровото налягане w_e .

2.1. Стандарт БДС EN 1991-1-4 от 2005 г.

Видимо от фиг. 1, посочената в стандарта методика следва да се прилага за сферични куполи на кръгла основа.

Стойностите на аеродинамичните коефициенти c_{pe} се определят в зависимост от отношенията h/d и f/d , вж. фиг. 1.



Фиг. 1. Препоръчителни стойности на коефициента $c_{pe,10}$ за куполи на кръгла основа [1]

В този конкретен случай параметрите на резервоара и неговия покрив са както следва:

- височина на корпуса на резервоара $h = 11,92$ m;
- диаметър на резервоара $d = 15,18$ m;
- „стрелка“ на покрива $f = 0,95$ m.

$$\frac{h}{d} = \frac{11,92}{15,18} = 0,785, \quad (2)$$

$$\frac{f}{d} = \frac{0,95}{15,18} = 0,0626. \quad (3)$$

Точка „А”, място на снаждане между покрива и корпуса, наветрена страна:

$$c_{pe,A} = -1,4, \\ w_{e,A} = q_p(12,4). c_{pe,A} = 1,301.(-1,40) = -1,821 \text{ kN/m}^2.$$

Точка „В”, среда на покрива:

$$c_{pe,B} = -0,49, \\ w_{e,B} = q_p(13,35). c_{pe,B} = 1,333.(-0,49) = -0,653 \text{ kN/m}^2.$$

Точка „С”, място на снаждане между покрива и корпуса, подветрена страна:

$$c_{pe,C} = -0,49, \\ w_{e,C} = q_p(12,4). c_{pe,C} = 1,301.(-0,49) = -0,637 \text{ kN/m}^2.$$

Точка „АВ”, по средата между точки „А” и „В”:

$$c_{pe,AB} = -0,945, \\ w_{e,AB} = q_p(12,875). c_{pe,AB} = 1,311.(-0,945) = -1,239 \text{ kN/m}^2.$$

Точка „ВС”, по средата между точки „В” и „С”:

$$c_{pe,BC} = -0,49, \\ w_{e,BC} = q_p(12,875). c_{pe,BC} = 1,311.(-0,49) = -0,642 \text{ kN/m}^2.$$

Средната стойност на ветровото налягане по покрива ще бъде определена по формулата:

$$w_{e,m} = \frac{A_1}{A} (w_{e,A} + w_{e,C}) + \frac{A_2}{A} (w_{e,AB} + w_{e,BC}) + \frac{A_3}{A} w_{e,AB} = \\ = \frac{13,06}{181} (-1,821 - 0,637) + \frac{48,93}{181} (-1,239 - 0,642) + \frac{57}{181} (-0,653) = -0,892 \text{ kN/m}^2, \quad (4)$$

където A_1 е хоризонталната проекция на площта на покрива, непосредствено до крайните т. „А” или т. „С”;

A_2 – хоризонталната проекция на площта на покрива около междинните т. „АВ” или т. „ВС”;

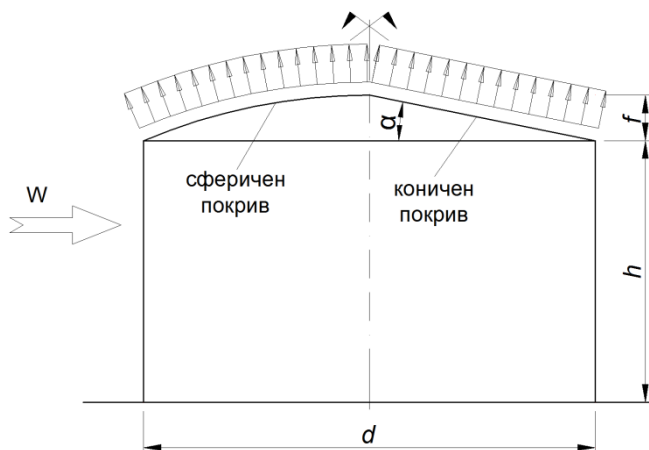
A_3 – хоризонталната проекция на площта на покрива около средната т. „В”;

$A = A_1 + A_2 + A_3$ – цялата хоризонтална проекция на площта на коничния покрив.

2.2. Наредба № 3 от 2004 г.

Посочената в Наредба № 3 [2] методика е приложима за:

- плосък коничен покрив, при който ъгълът на наклона $\alpha \leq 5^\circ$;
- сферичен покрив, при който „стрелката“ f и диаметърът d , вж. фиг. 2, удовлетворяват отношението $f/d \leq 0,1$.



Фиг. 2. Схема и размери на резервоара

Предвид факта, че отношението $h/d = 0,785$, чрез линейна интерполация от табл. 1 е отчетено, че аеродинамичният коефициент е със стойност $c_{pe} = -0,735$.

Таблица 1. Стойности на коефициента c_{pe} в зависимост от h/d

Вид на покрива	h/d		
	1/6	1/3	≥ 1
плосък, коничен – при $\alpha \leq 5^\circ$ сферичен – при $f/d \leq 0,1$	-0,5	-0,6	-0,8

При приета изчислителна височина $z_e = 12,875$ m, респективно $q_p(z_e) = 1,311$ kN/m², средната стойност на ветровото налягане по покрива ще бъде:

$$w_{e,m} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1,311 \cdot (-0,735) = -0,963 \text{ kN/m}^2.$$

2.3. Американски стандарт ASCE7-05 от 2006 г.

Стойностите на аеродинамичните коефициенти c_{pe} се определят в зависимост от отношенията h/d и f/d , по схема, идентична на показаната на фиг. 1. Явно има някакво заимстване между ASCE7-05 [3] и БДС EN 1991-1-4 [1].

2.4. Американски стандарт API 650, 12th Edition, Add. 3 от 2018 г.

В стандарт API 650 [4] няма ограничение по формата (сферичен или коничен) или по стойностите на отношението f/d . Средното натоварване от вятър по покрива се определя по формулата:

$$w_{e,m} = 1,44 \left(\frac{v}{190} \right)^2 = 1,44 \left(\frac{164,88}{190} \right)^2 = 1,084 \text{ kN/m}^2, \quad (5)$$

където v е скоростта на вятъра на средната височина $z_e = 12,875$ m, при интервал на осредняване от три секунди, в km/h. Определена е по формулата:

$$v = 3,6 \sqrt{\frac{2 \cdot q_p(z_e)}{\rho}} = 3,6 \sqrt{\frac{2 \cdot 1311}{1,25}} = 164,88 \text{ km/h}, \quad (6)$$

където $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ е плътността на въздуха.

2.5. Австралийски и новозеландски стандарт AS/NZS 1170.2 от 2011

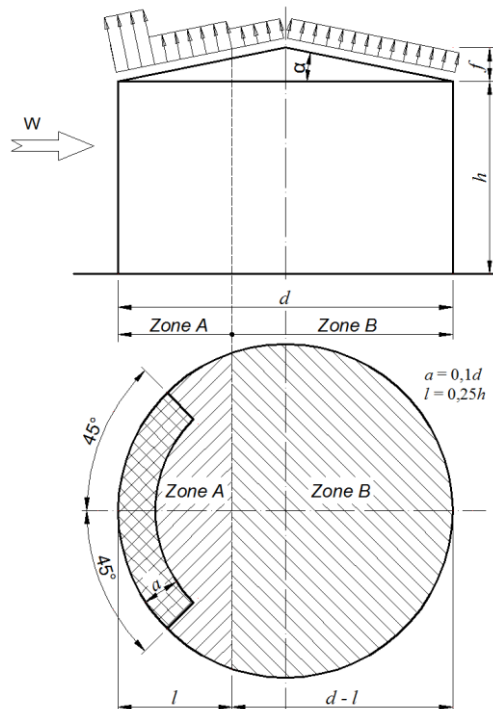
Методиката в стандарт AS/NZS 1170.2 [5] може да се прилага както при сферични, така и при конични покриви, но при следните ограничения:

- наклон на коничния покрив $\alpha < 10^\circ$;
- осреднен наклон на сферичния покрив $\alpha < 10^\circ$.

Стойностите на аеродинамичния коефициент c_{pe} за Zone A и Zone B, вж. фиг. 3, са посочени в табл. 2.

Таблица 2. Аеродинамични коефициенти за покриви на кръгла основа, силози и резервоари според AS/NZS 1170.2

Зона	Zone A	Zone B
c_{pe}	-0,8	-0,5



Фиг. 3. Схема на натоварването по покрива според AS/NZS 1170.2

Широчината на ръбовата зона – $a = 0,1d = 0,1 \cdot 15,18 = 1,518$ m;

Широчината на Zone A – $l = 0,25h = 0,25 \cdot 11,92 = 2,98$ m.

Аеродинамичните фактори, чрез които се определя външното натоварване от вятър по строителните конструкции, се определят чрез израза:

$$C_{\text{fig}} = c_{\text{pe}} \cdot K_a \cdot K_1, \quad (7)$$

където c_{pe} е аеродинамичният коефициент, определен от табл. 2;

K_a – коефициент, отчитащ размера на товарната площ;

K_1 – местен фактор на налягането.

Аеродинамичните фактори за показаните на фиг. 3 зони са както следва:

а) Zone A

– ръбова зона (зона A1)

$$C_{\text{fig},A1} = c_{\text{pe},A1} \cdot K_{a,A1} \cdot K_{1,A1} = -0,8 \cdot 0,958 \cdot 1,5 = -1,15; \quad (8)$$

– остатъчната вътрешна повърхност от Zone A (зона A2)

$$C_{\text{fig},A2} = c_{\text{pe},A2} \cdot K_{a,A2} \cdot K_{1,A2} = -0,8 \cdot 0,982 \cdot 1,0 = -0,786; \quad (9)$$

б) Zone B

$$C_{\text{fig},B} = c_{\text{pe},B} \cdot K_{a,B} \cdot K_{1,B} = -0,5 \cdot 0,8 \cdot 1,0 = -0,4. \quad (10)$$

Натоварването от вятър по покрива за показаните на фиг. 3 зони е както следва:

а) Zone A

– ръбова зона (зона A1)

$$w_{e,A1} = q_p(z_e) \cdot C_{\text{fig},A1} = 1,301 \cdot (-1,15) = -1,496 \text{ kN/m}^2; \quad (11)$$

– остатъчната вътрешна повърхност от Zone A (зона A2)

$$w_{e,A2} = q_p(z_e) \cdot C_{\text{fig},A2} = 1,311 \cdot (-0,786) = -1,03 \text{ kN/m}^2; \quad (12)$$

б) Zone B

$$w_{e,B} = q_p(z_e) \cdot C_{\text{fig},B} = 1,311 \cdot (-0,4) = -0,524 \text{ kN/m}^2. \quad (13)$$

Средна стойност на ветровото налягане по покрива ще бъде определена по формулата:

$$\begin{aligned} w_{e,m} &= \frac{A_{A1}}{A} w_{e,A1} + \frac{A_{A2}}{A} w_{e,A2} + \frac{A_B}{A} w_{e,B} = \\ &= \frac{16,288}{181} (-1,496) + \frac{12,69}{181} (-1,03) + \frac{152}{181} (-0,524) = -0,647 \text{ kN/m}^2, \end{aligned} \quad (14)$$

където A_{A1} е хоризонталната проекция на площта на ръбовата зона A1 на покрива;

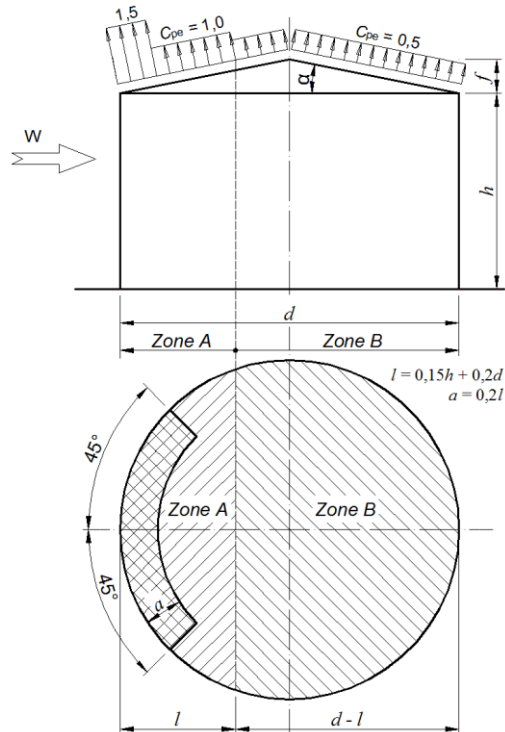
A_{A2} – хоризонталната проекция на остатъчната вътрешна повърхност от Zone A (зона A2);

A_B – хоризонталната проекция на площта на Zone B на покрива, вж. фиг. 3;
 $A = A_{A1} + A_{A2} + A_B$ – цялата хоризонтална проекция на площта на коничния покрив.

2.6. Индийски стандарт IS 875 Part 3 от 2015 г.

Методиката в стандарт IS 875 Part 3 [6] може да се прилага както при сферични, така и при конични покриви, но със следните ограничения:

- височината h на цилиндричното тяло, вж. фиг. 4, е в границите $0,2d < h < 3d$;
- ъгълът α на наклона на покрива удовлетворява неравенството $\text{tg } \alpha < 0,2$.



Фиг. 4. Схема на натоварването по покрива според IS 875 Part 3

Широчината на ръбовата зона – $a = 0,2l = 0,2 \cdot 4,824 = 0,965$ m.

Широчината на Zone A – $l = 0,15h + 0,2d = 0,15 \cdot 11,92 + 0,2 \cdot 15,18 = 4,824$ m.

Стойностите на аеродинамичния коефициент c_{pe} за Zone A и Zone B, вж. фиг. 4, са посочени в табл. 3.

Таблица 3. Аеродинамични коефициенти за покриви на кръгла основа, силози и резервоари според IS 875 Part 3

Зона	Zone A		Zone B
	ръбова зона	останала зона	
c_{pe}	-1,5	-1,0	-0,5

При определяне на сумарната повдигаща покрива сила F_z стандартът допуска използването на осреднен аеродинамичен коефициент c_{pe} . Стойностите му се отчитат от табл. 4 в зависимост от отношението h/d .

Таблица 4. Осреднени стойности на коефициента c_{pe} , в зависимост от h/d

Вид на покрива	h/d		
	0,5	1,00	2,00
плосък, коничен, сферичен	-0,65	-1,0	-1,0

От резултатите по-горе се вижда, че най-голямо налягане от ветровото въздействие се получава според стандарт IS 875 (Part 3):2015 [6], а най-малко – според AS/NZS 1170.2:2011 [5]. Стандарт БДС EN 1991-1-4 [1], респективно ASCE7-05 [3], дава вторите най-малки стойности за ветровото натоварване по покрив на кръгла основа.

3. Числено определяне на ветровото натоварване по покрива

В посочените по-горе стандарти Наредба № 3 [2], API 650, 12th Edition, Add. 3 [4], AS/NZS 1170.2 [5], IS 875 Part 3 [6] не се прави разлика между коничен и сферичен покрив при определяне на стойностите на ветровото натоварване. А е неизбежно да има различия. Въпросът е дали те са малки, пренебрежими, или са съществени. С цел да намери отговор на този въпрос, авторът е направил числена симулация на разглеждания резервоар, но с два вида покриви – коничен и сферичен.

3.1. Моделиране

Чрез графичния интерфейс Workbench на ANSYS [7] и неговия модул Fluid Flow (CFX) са създадени два пространствени модела на стоманения вертикален цилиндричен резервоар, изследван аналитично по-горе. В единия модел покривът е коничен, както е изпълнен по проект, а в другия – сферичен, със „стрелка“ $f = 0,95$ m, както е при коничния покрив.

Стените на симулирания аеродинамичен тунел около резервоара се намират на следното разстояние от него:

- а) вход на флуида – на 23 m;
- б) изход на флуида – на 46 m;
- в) странични стени (две вертикални и една хоризонтална) – на 26 m.

При определяне на посочените по-горе разстояния е изходено от принципа, че стените на виртуалния аеродинамичен тунел не трябва да влияят на въздушния поток непосредствено до резервоара [8]. В същото време, с цел избягване на тежки компютърни решения и спестяване на изчислително време, се държи сметка за максималния брой на крайните елементи. Затова авторът е спазил следните ограничения:

- а) входът на флуида и страничните стени да са не по-близо от 1,5 пъти диаметъра d на изследвания обект;
- б) изходът на флуида да е не по-близо от 3 пъти диаметъра d на резервоара.

Флуидът, който ще обтича резервоара, е въздух с температура 25 °С. Скоростта му при входа на ограждането е постоянна по височина и е със стойност $v = 46,19$ m/s, определена съгласно БДС EN 1991-1-4 [1] за височина над терена $z_e = 13,35$ m както при

ръбовете, така и по страните им. За да се оптимизира мрежата от крайни елементи, тя е значително съгъстена в зоната около резервоара и по-разредена към периферията [9]. Максималният им размер е ограничен до:

- а) елементи в непосредствен контакт с корпуса и покрива на резервоара – 100 mm;
- б) всички останали елементи – 1 000 mm.

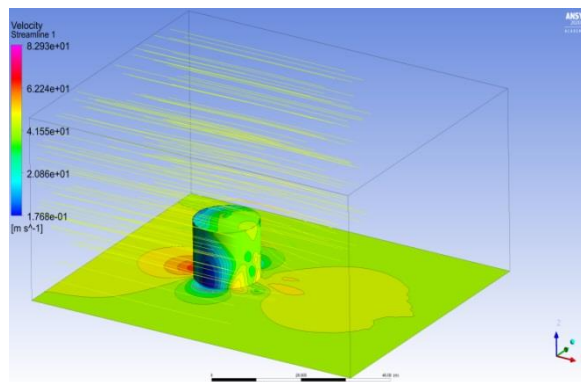
Първоначално е прието, че моделите на резервоарите и околния терен ще бъдат напълно гладки. След това е направена симулация, при която са отчетени грапавините по резервоара и околния терен, както следва:

- а) $z_0 = 0,2$ mm – за корпуса и покрива на резервоара;
- б) $z_0 = 100$ mm – за околния терен. Авторът се опита да симулира околнен терен с грапавост $z_0 = 300$ mm, отговарящ на категория III, но програмата не го допускаше.

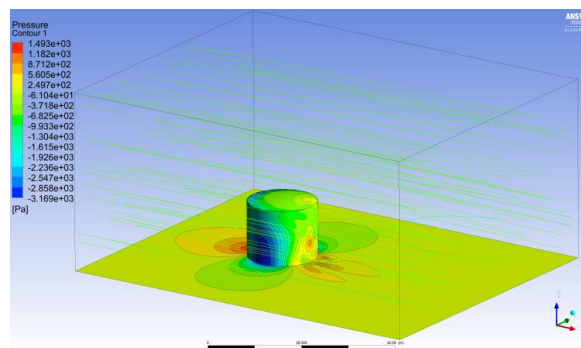
3.2. Резултати от численото моделиране

3.2.1. Изследване при гладки резервоар и околнен терен

Обтичането на двата гладки модела на резервоара е показано на фиг. 5. Отчетени са скорости на вятъра, надвишаващи 85 m/s.



а) резервоар с коничен покрив

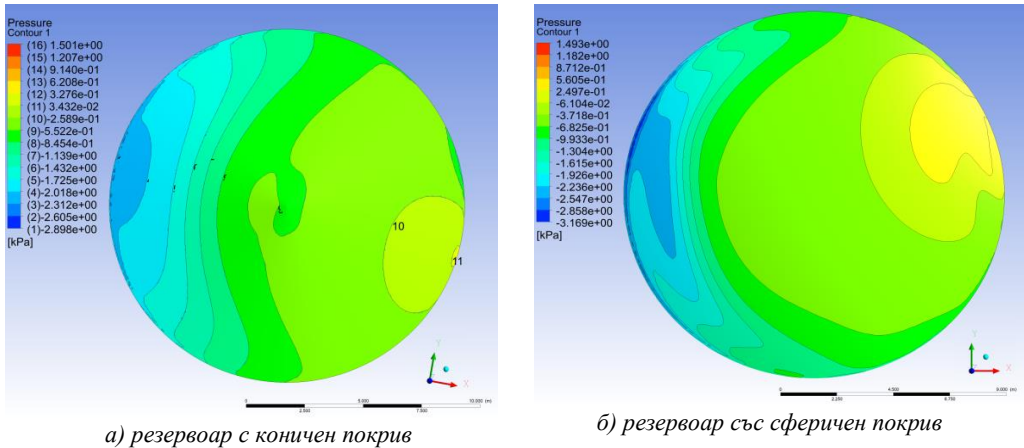


б) резервоар със сферичен покрив

Фиг. 5. Скорости и налягане на ветровия поток, обтичащ гладките резервоари

Налягането по гладките коничен и сферичен покрив на резервоара е показано на фиг. 6. На тях се забелязва следното:

- ветровото въздействие е неравномерно в план, като близо до наветрената страна то действа отдолу нагоре (смучене), докато близо до подветрената страна са отчетени малки зони, където то действа отгоре надолу (натиск);
- за разлика от изследването на *Verma* и *Ahuja* [10], зоните с еднакво налягане по покрива не са разположени напълно симетрично спрямо направлението на ветровия поток (ос x). Това явление е по-отчетливо изразено при сферичния покрив;
- аеродинамичният коефициент $c_{pe,10}$ не е постоянен по дъгите на окръжностите, представляващи пресечните линии на сферата с равнини, които са перпендикулярни на ветровия поток, вж. фиг. 1.



Фиг. 6. Налягане по покрива на резервоара, обтичан от вятър, при който повърхностите са гладки

Отчетените с помощта на инж. Мария Пантушева стойности на повдигащите покривите сили са както следва:

- при резервоара с коничен покрив – $F_z = 150,02$ kN;
- при резервоара със сферичен покрив – $F_z = 145,45$ kN.

Оттук, осреднената стойност на вертикалната компонента на ветровото налягане по покрива е:

- при резервоара с гладък коничен покрив – $w_{e,m,z} = 0,829$ kN/m²;
- при резервоара с гладък сферичен покрив – $w_{e,m,z} = 0,804$ kN/m².

Разликата между отчетените стойности е от порядъка на 3%, т.е. не е голяма.

Предвид малките наклони на покривите, с много малка грешка може да се приеме, че $w_{e,m,z} = w_{e,m}$. Ако се сравнят резултатите, получени за двата типа покриви се вижда, че резултатното усилие F_z , респективно осредненото налягане $w_{e,m}$, при гладкия коничен покрив е по-голямо, отколкото при сферичния.

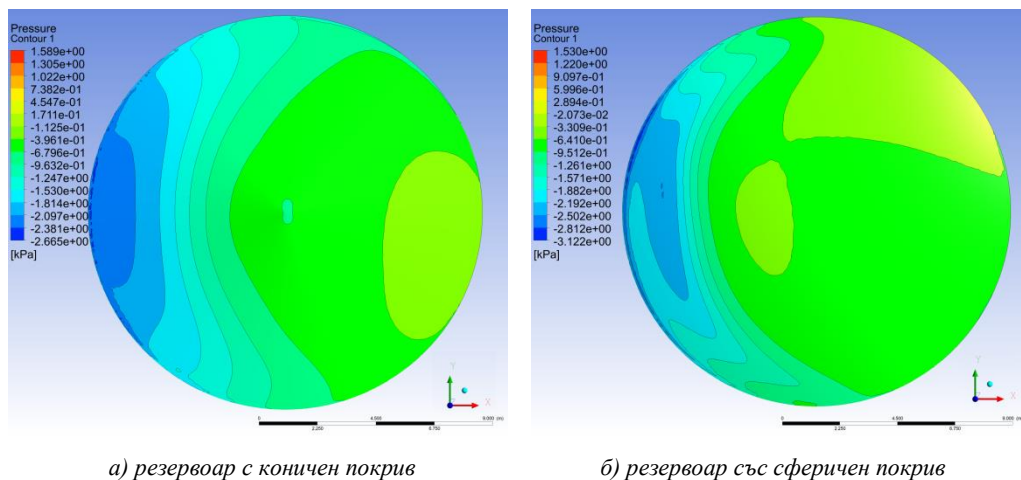
По гладките покриви са отчетени и хоризонтални сили, чието направление е обротно на ветровия поток. Този ефект не следва да е изненадващ, тъй като повърхнините на покривите са наклонени, в наветрената зона е отчетено интензивно смучене, а в подветрената – смучене с малък интензитет и/или натиск. Стойностите на хоризонталните сили са както следва:

- при резервоара с гладък коничен покрив – $F_x = 7,52$ kN;
- при резервоара с гладък сферичен покрив – $F_x = 11,45$ kN.

3.2.2. Изследване при отчитане на грапавината на резервоара и околнен терен

Отчетените тук скорости на вятъра надвишават 83 m/s.

Налягането по грапавите коничен и сферичен покрив на резервоара е показано на фиг. 7. В тях се забелязват същите особености, каквито са описани по-горе, при гладките резервоари, с изключение на наличие на натискови зони по покривите. Тук по цялата повърхност на покривите е констатирано смучене.



Фиг. 7. Налягане по покрива на резервоара, обтичан от вятър при отчитане на грапавините по повърхностите

Отчетените стойности на повдигащите покривите сили са както следва:

- а) при резервоара с коничен покрив – $F_z = 169,7$ kN;
- б) при резервоара със сферичен покрив – $F_z = 173,73$ kN.

Оттук, осреднената стойност на вертикалната компонента на ветровото налягане по покрива е:

- а) при резервоара с коничен покрив и грапавини – $w_{e,m,z} = 0,938$ kN/m²;
- б) при резервоара със сферичен покрив и грапавини – $w_{e,m,z} = 0,96$ kN/m².

Разликата между отчетените тук стойности е от порядъка на 2,3%.

Предвид малките наклони на покривите, тук също може с много малка грешка да се приеме, че $w_{e,m,z} = w_{e,m}$. Тук резултантното вертикално усилие F_z , респективно осредненото налягане $w_{e,m}$, при сферичния покрив е по-голямо, отколкото при коничния.

Отчетените тук стойности на хоризонталните сили в покривите, чието направление е обратно на ветровия поток, са както следва:

- а) при резервоара с коничен покрив – $F_x = 7,476$ kN;
- б) при резервоара със сферичен покрив – $F_x = 9,271$ kN.

4. Резултати

Получените аналитично, чрез посочените по-горе стандарти, и числено, чрез ANSYS, резултати, са посочени в табл. 5. Авторът още веднъж обръща внимание на факта, че стандартите не правят разлика между коничен и сферичен покрив.

От направеното изследване се вижда, че има съществени различия между получените стойности за ветровото натоварване по покрива. Определените чрез числени методи стойности на налягането по коничния и сферичния покрив с грапавини са между определените чрез БДС EN 1991-1-4 и API 650.

Таблица 5. Среднени стойности на ветровото налягане по покрива $w_{e,m}$, kN/m²

Метод	Аналитично						Числено	
	БДС EN 1991-1-4	НАРЕДБА №3	ASCE7-05	API 650	AS/NZS 1170.2:2011	IS 875 (Part 3): 2015	коничен	сферичен
$w_{e,m}$, kN/m ²	-0,892	-0,963	-0,892	-1,084	-0,647	-1,114	-0,938	-0,96

5. Изводи

От направеното изследване за ветровото налягане по коничен и сферичен покрив на кръгла основа могат да се направят следните изводи:

- при едни и същи изходни условия националните стандарти дават различни стойности за ветровото налягане по покрива. Най-високи стойности са получени чрез IS 875 (Part 3):2015 [6], а най-ниски – според AS/NZS 1170.2:2011 [5]. Разликата между тях надвишава 70%;
- получените чрез числени методи стойности на налягането по грапавите коничен и сферичен покрив на резервоарите са между определените чрез БДС EN 1991-1-4 [1] и API 650 [4];
- от определените чрез числени методи стойности на налягането по коничния и сферичния покрив може да се заключи, че има разлики между тях. Сумарното налягане по сферичния покрив с грапавини е по-високо, отколкото при коничния. При гладките покриви е обратно. Отчетените тук разлики са от порядъка на 2 – 3%;
- за разлика от посоченото в БДС EN 1991-1-4 [1], численото изследване показва, че аеродинамичният коефициент c_{pe} не е постоянен по дъгите на окръжностите, представляващи пресечните линии на сферата с равнини, които са перпендикулярни на ветровия поток, вж. фиг. 1.

ЛИТЕРАТУРА

- БДС EN 1991-1-4:2005. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. Bulgarian Institute for Standardization, October, 2005.
- Ordinance № 3 for the basic provisions for the design of the structures of the constructions and the actions on them. DV, Issue 92 by 2004.
- ASCE7-05. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, 2006, ISBN 0-7844-0831-9.

4. API 650. Welded Steel Tanks for Oil Storage, 12th Edition, Addendum 3. American Petroleum Institute, Washington, 2018.
5. AS/NZS 1170.2:2011. Structural Design Actions. Part 2: Wind actions. Standards Australia Limited / Standards New Zealand, 2011, ISBN 978-0-7337-9805-4.
6. IS 875 (Part 3):2015. Design Loads (Other than Earthquake) for Buildings and Structures – Code of Practice. Part 3 Wind Loads. BIS, 2015.
7. ANSYS® v.2020 R2 Documentation. Ansys Inc., Canonsburg, PA, the USA.
8. *Rusev, I. Tanev, T., Dinev, D.* Numerical study of wind actions on tall buildings with ANSYS CFX and comparison with EN1991-1-4. XII International scientific conference VSU'2012, vol. 1, pp. 83-88. Sofia, 2012 (in Bulgarian).
9. *Rusev, I., Dinev, D., Tanev, T.* Numerical study of wind actions on nearby tall buildings. International Jubilee Scientific Conference UACEG'2012. Sofia, 15-17 November, 2012 (in Bulgarian).
10. *Verma, A., Ahuja, A.* Wind Pressure Distribution on Domical Roofs. International Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 2, issue 5, pp. 51-53. May, 2015.

WIND LOADS ON ROOFS ON CIRCULAR BASE

L. Zdravkov¹

Keywords: *vertical tank, cone and dome roofs, wind pressure, standard, FEA*

ABSTRACT

Due to replacement of the stored product, the working conditions of a tank with a V2000 m³ capacity and a supported cone roof will be changed. It should be checked for sufficient bearing capacity. Part of the calculations includes testing for complete displacement of an empty tank, loaded by wind and overpressure. When the conical roof is surrounded by a stream of wind, it results in forces acting from the bottom up, which, combined with the overpressure, could lead to a complete lifting of the facility.

The conical roof considered here is outside the scope of application of standards EN 1991-1-4 or Ordinance No. 3 of 2004. This enforced the author to proceed as follows:

- a) to look for other standards that address the wind load on a cone roof and to compare the obtained results;
- b) to create computer models of the airflow around the tank, which has two types of roofs – conical and spherical. Through them he tried to determine:
 - the values of wind pressure on the two types of roofs;
 - is there a large difference in wind load on spherical and conical roofs.

The numerical modeling and analysis of the tanks have established that the wind pressure is different for conical and spherical roofs, even if they have the same height.

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