

ПРОЕКТИРАНЕ НА САМОНОСЕЩИ СФЕРИЧНИ ПОКРИВИ

Любомир А. Здравков^a и Тоня Д. Динчева^b

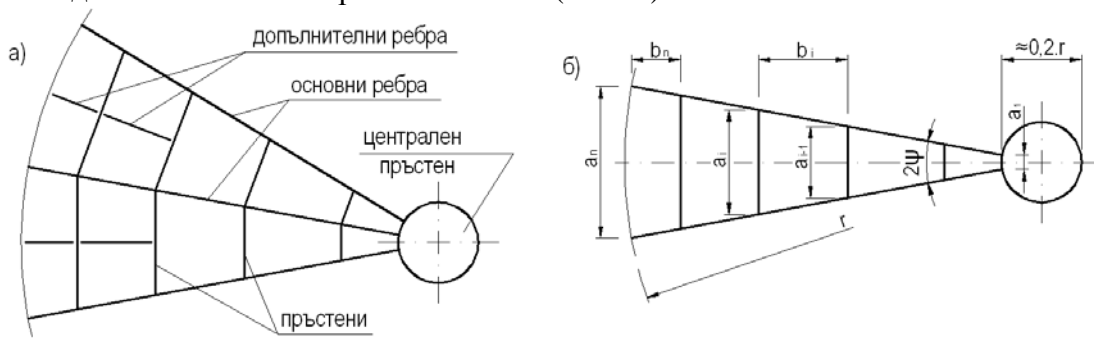
^a “OKZ Holding” a.s., отдел “Проектиране”, България

^b “OKZ Holding” a.s., ръководител на отдел “Проектиране”, Чехия

ВЪВЕДЕНИЕ

Куполите на кръгла основа имат широко поле за приложение – силози, резервоари, складове за отпадъци, спортни и изложбени зали. Те са леки, красиви и могат да премостват големи отвори, осигуряващи свободно пространство без вътрешни колони. Стоманените куполи се прилагат успешно при отвори с диаметър $D \leq 50,0$ m.

Значима част от куполите се използват за покритие на стоманени резервоари за съхранение на нефтопродукти. Традиционно, тяхната конструкция се състои от радиални греди, пръстеновидни елементи и покривна обшивка (Фиг. 1).



Фиг. 1 Ребрен скелет самоносещ купол

а) основни елементи

б) изчислителна схема

1 ТОВАРИ И ТОВАРНИ КОМБИНАЦИИ

Изчисляването и оразмеряването на покривните куполи за експлоатационно състояние обикновено се извършва за 2-е товарни състояния. При първата от тях, сумарното натоварване q_1 действа отгоре надолу. При втората комбинация, натоварването върху покрива q_2 действа отдолу нагоре:

$$q_1 = \max \begin{cases} \gamma_{Fg,sup} \cdot g_n + \gamma_{Ft} \cdot g_{tn} + \gamma_{Fs} \cdot s_n + \gamma_{Fv} \cdot \psi_0 \cdot p_v^n \downarrow \\ \gamma_{Fg,sup} \cdot g_n + \gamma_{Ft} \cdot g_{tn} + \gamma_{Fv} \cdot p_v^n + \gamma_{Fs} \cdot \psi_0 \cdot s_n \downarrow \end{cases} \quad (1.1)$$

$$q_2 = \max \begin{cases} \gamma_{Fa} \cdot p_o^n + \gamma_{Fw} \cdot \psi_0 \cdot w_n - \gamma_{Fg,inf} \cdot (g_n + g_{tn}) \uparrow \\ \gamma_{Fw} \cdot w_n + \gamma_{Fa} \cdot \psi_0 \cdot p_o^n - \gamma_{Fg,inf} \cdot (g_n + g_{tn}) \uparrow \end{cases} \quad (1.2)$$

където: g_n е характеристичната стойност за натоварване от собствено тегло;

g_{tn} е характеристичната стойност на теглото на топлоизолацията по покрива (ако има такава);

p_v^n е характеристичната стойност на подналягането (вакуума) под купола;

s_n е характеристичната стойност на натоварването от сняг в района на изграждане;

p_o^n е характеристичната стойност на свръхналягането под купола;

w_n е характеристичната стойност на натоварването от вятър по купола;

$\gamma_{Fg,sup}$, $\gamma_{Fg,inf}$, γ_{Fa} , γ_{Fv} , γ_{Fs} , γ_{Fw} – частни коефициенти за натоварване, по EN 1990 [3];

ψ_0 е коефициент за съчетание на временни товари [3].

2 УСИЛИЯ В ЕЛЕМЕНТИТЕ НА КУПОЛА

Пространствените стоманени ребресто-пръстеновидни куполи са многократно статически неопределими системи. Усилията в техните елементи трудно биха били определени с аналитични методи. Прецизното определяне на разрезните усилия в елементите на стоманената конструкция на купола може да бъде направено само чрез използване на подходящи програми. Чрез тях се отчита влиянието на коравината на елементите и възлите.

С известни опростявания, предварително аналитично оразмеряване на стоманените елементи в купола може да бъде извършено с цел определяне на необходимите сечения на ребрата и пръстените, които ще бъдат въведени в пространствения изчислителен модел.

2.1 Усилия в елементите на купола, съгласно посочената от Е. Лессиг [2] процедура

Тук показаната процедура е използвана от българските инженери от дълго време. Тя е прилагана при множество сферични покриви на стоманени резервоари, които в момента са в експлоатация.

Определянето на необходимите сечения на ребресто – пръстеновидните куполи се извършва на база ставно – прътова система. Характерна особеност тук е, че ефективната дължина на натиснатите елементи е равна на геометричната, т.е. на разстоянието между възлите.

Най-голяма осова сила S_i (натиск при комбинация q_1 и опън при комбинация q_2) в радиалните греди се получава, когато целият изчислителен товар е приложен върху върху цялата повърхност на покрива. Усилието в i -и възел се определя съгласно формулата:

$$S_i = \frac{A_i \cdot q}{n \cdot \sin \alpha_i} \quad (2.1)$$

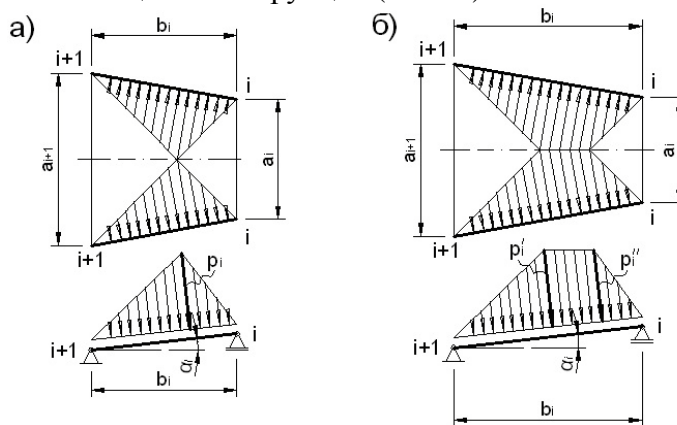
където: A_i е площта на кръга, ограничена от i -ти пръстен;

q е натоварването от товарна комбинация q_1 или q_2 ;

n е броят на главните радиални греди в купола;

α_i е ъгълът между допирателната към гредата в i -ти възел и хоризонталната равнина.

Освен осово усилие, в гредите се получават и огъващи моменти от разпределените товари в полетата, ограничени от носещата конструкция (Фиг. 2).



Фиг. 2 Схема на натоварването на гредите
а) с триъгълников товар б) с трапецовиден товар

Когато $\bar{a}_i \geq b_i$, върху гредата, разглеждана като проста греда с отвор b_i , действа разпределен по триъгълников закон товар (Фиг. 2 – а). Максималният огъващ момент M_{\max} се определя чрез израза:

$$M_{\max} = \frac{1}{12} p_i \cdot b_i^2 \quad (2.2)$$

Когато $\bar{a}_i < b_i$, разпределеният товар е с трапецовидно очертание (Фиг. 2 – б) и стойността на максималния огъващ момент M_{\max} е:

$$M_{\max} = \frac{1}{24} p_i \cdot (3b_i^2 - \bar{a}_i^2) \quad (2.3)$$

където \bar{a}_i е средната широчина на полето.

Стойността на p_i във формули (2.2) и (2.3) се получава чрез сумиране на товарите от 2-е съседни полета, съгласно схемите, показани на Фиг. 2.

Главните радиални греди се оразмеряват като нецентрично натиснати (при товарна комбинация q_1) и / или като нецентрично опънати (при товарна комбинация q_2).

Когато покривната обшивка не е заварена към конструкцията, и наклонът на покрива $i > 1:16$, конструктивните елементи следва да бъдат проверявани за загуба на обща устойчивост. Приема се, че изкълчвателната дължина е равна на геометричното разстояние между възлите на снаждане радиални греди – радиални пръстени.

Когато покривната обшивка е заварена за радиалните греди и пръстеновидните елементи, тяхната устойчивост в равнината на обшивката е осигурена.

Най-голямата стойност на натисковата сила $T_{c,i}$ в i -и пръстен се получава, когато подвижния товар върху покрива (сняг или хора) е разположен извън изследвания i -и пръстен (Фиг. 3). Изчислява се съгласно формулата:

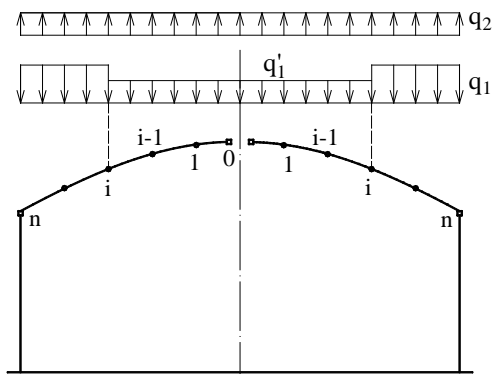
$$T_{c,i} = \frac{1}{2 \cdot n \cdot \sin \psi} \cdot (\cotg(\alpha_i) \cdot q'_1 \cdot A_i - \cotg(\alpha_{i+1}) \cdot (q_1 \cdot (A_{i+1} - A_i) + q'_1 \cdot A_i)) \quad (2.4)$$

където:

$$q'_1 = \gamma_{Fg, \text{sup}} \cdot g_n + \gamma_{Ft} \cdot g_m + \gamma_{Fv} \cdot p_v^n \downarrow \quad (2.5)$$

$$2 \cdot \psi = \frac{2 \cdot \pi}{n}, [\text{rad}] \quad (2.6)$$

в която n е броят на основните радиални греди (Фиг. 1).



Фиг. 3 Товарни схеми за получаване на максималните усилия в пръстените

Максималната опънна сила $T_{t,i}$ в i -и пръстен се изчислява по формулата:

$$T_{t,i} = \frac{q_2}{2 \cdot n \cdot \sin \psi} \cdot (\cotg(\alpha_{i+1}) \cdot A_{i+1} - \cotg(\alpha_i) \cdot A_i) \quad (2.7)$$

В резултат от натоварването и начина на предаване на усилията в купола, в пръстеновидните елементи възникват и огъващи моменти. За тяхното определяне е прието, че статическата схема на един пръстеновиден елемент е проста греда и изчислителната му дължина е равна на геометричната. Максималните стойности на огъващите моменти се изчисляват по формули, аналогични на (2.2) и (2.3).

Елементите на пръстените се оразмеряват като нецентрично натиснати (при товарна комбинация q_1) и / или като нецентрично опънати (при товарна комбинация q_2).

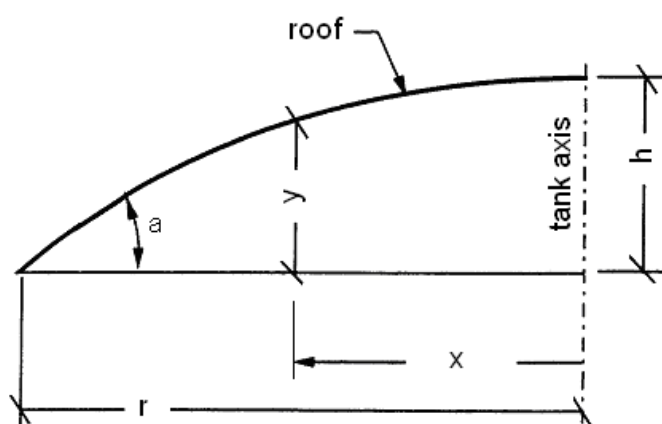
Определените по тази методика сечения на стоманената конструкция са близки до реално необходимите [1]. Често се получават малко по-големи от нужните, но винаги е необходимо те да бъдат проверявани и числено. Освен това пространствените компютърни модели дават възможност да се оптимизира конструкцията и да се отчита влиянието на несиметричното натоварване върху купола.

2.2 Усилия в елементите на купола, съгласно посочената в EN 1993-4-2 [5] процедура

Съгласно тази методология, записана в европейския стандарт EN 1993-4-2, броят, сечението и разположението на стоманените пръстени не се отчита. Цялото внимание е съсредоточено върху радиалните греди. Тук не се отчита съвместната работа на радиалните греди и пръстеновидните елементи. В този смисъл, посочената тук методика е подходяща за сферични куполи, в които стоманената конструкция е над покривната обшивка.

Използването на описаната в EN 1993-4-2 процедура е възможно, ако е изпълнено следното:

- диаметърът D на кръглата основа е по-малък от 60,0 m;
- разпределението на товара по купола не се отклонява много от вертикалната ос на симетрия.



Фиг. 4 Координати на сферичния купол

За сферични куполи, които са подложени на въздействието на разпределени товари, максималната вертикална изчислителна сила в една радиална греда, може да бъде определена чрез израза:

$$P_{Ed} = \beta \cdot r^2 p_{v,Ed} \quad (2.8)$$

в която: r е радиуса на кръглата основа на купола (Фиг. 4);

$p_{v,Ed} = q_1$ е максималната вертикална компонента на оразмерителния товар;

$$\beta = \frac{\pi}{n}, \text{ rad} \quad (2.9)$$

където: n е броят на главните радиални греди.

Осовата сила N_{Ed} и огъващият момент M_{Ed} във всяка радиална греда, необходими за оразмеряване съгласно EN 1993-1-1 [4], могат да бъдат определени чрез изразите:

$$N_{Ed} = 0,375 \frac{r}{h} P_{Ed} \quad (2.10)$$

$$M_{Ed} = \frac{1}{3} \left(\frac{r}{1-\varepsilon} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{x}{r} \right)^3 - 1,10 \left(\frac{y}{h} \right) \right\} P_{Ed} \quad (2.11)$$

когато са изпълнени следните условия:

$$p_{v,Ed} \geq 1,2 \text{ kN/m}^2$$

$$I_y \geq \frac{N_{Ed} \cdot r^2}{\pi^2 \cdot E} \quad (2.12)$$

$$b_K \geq 2 \cdot h_K \quad (2.13)$$

$$A_1 \geq A_2 \quad (2.14)$$

$$h_K^2 \left(\frac{A_1 \cdot A_2}{A_1 + A_2} \right) \geq \frac{I_y}{2 \cdot \beta} \quad (2.15)$$

в които:

$$\varepsilon = N_{Ed} \frac{(0,6r)^2}{\pi^2 EI_y} \quad (2.16)$$

където: h е “стрелката” на покрива (Фиг. 4);
 x е радиалното разстояние от вертикалната ос на симетрия на купола;
 y е височината на покрива при абсциса x ;
 b_K е широчината на пояса на централния опорен пръстен;
 h_K е вертикалното разстояние между поясите на централния пръстен;
 A_1 е площта на горния пояс на централния пръстен;
 A_2 е площта на долния пояс на централния пръстен;
 I_y е инерционният момент на главната радиална греда спрямо хоризонталната ос.

3 АНАЛИТИЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОСТРАНСТВЕНИ СТОМАНЕНИ КУПОЛИ

Изследвани са няколко сферични купола на кръгла основа. Те имат различни височини (“стрелки”) и диаметри D на основата. Проектирани се за различни точки на Земята и товарите върху тях са най-различни. Стоманената покривна обшивка не е заварена за носещата конструкция, от което следва, че ще бъде отчетена само товарна комбинация q_1 . Посочените в това изследване куполи са взети от реалната практика. Част от тях са построени, а останалите са в процес на изграждане.

Първоначално усилията в елементите на сферичните куполи са определени по посочената в т. 2.1 методика. Чрез получените усилия S_i , T_i and M_{max} , използвайки правилата за оразмеряване в EN1993-1-1 [4], са определени необходимите горещовалцувани профили.

След това, усилията в конструктивните елементи на куполите са определени съгласно описаната в т. 2.2 методика. Използвайки получените оразмерителни усилия N_{Ed} и M_{Ed} , и правилата за оразмеряване в EN1993-1-1 [4], са определени необходимите профили.

В таблиците по-долу е показана част от изследваните куполи, с техните диаметри D при основата. Покривната обшивка е разположена над конструкцията.

Основните радиални греди в сферичния купол са проверени за:

- монтажно състояние, което е едно и също за 2-те методики;
- работно състояние.

Стоманените сечения, получени от изчисляване по 2-те методики са сравнени в таблиците по-долу.

Таблица 1 Резервоар T080, La Reunion, France

Обем $V = 3000 \text{ m}^3$	Диаметър $D = 16 \text{ m}$	Височина на корпуса $H = 15 \text{ m}$
Радиус на огъване на сферичния купол – $R_r = 20,5 \text{ m}$		
Методика на Е. Лессиг [2]		
радиални греди - IPE100, steel S235, 24 бр.	$M_{Ed} = 2,35 \text{ kN.m}$	$N_{Ed} = -56,46 \text{ kN}$
пръстени – IPE 80, steel S235, 4 бр.		
Тегло на покривната конструкция – 2 277 kg		
Методика на EN 1993-4-2 [5]		
радиални греди - IPE140, steel S235, 24 бр.	$M_{Ed} = -6,82 \text{ kN.m}$	$N_{Ed} = -47,06 \text{ kN}$
пръстени - IPE 80, steel S235, 4 бр., поставени да носят покривната обшивка		
Тегло на покривната конструкция – 3 131 kg		

Таблица 2 Резервоар T016, Martinique, France

Обем $V = 14\,650\text{ m}^3$	Диаметър $D = 36\text{ m}$	Височина на корпуса $H = 15,6\text{ m}$
Радиус на огъване на сферичния купол – $R_r = 48\text{ m}$		
Методика на Е. Лессиг [2]		
радиални греди – IPE220, steel S235, 48 бр.	$M_{Ed} = 4,36\text{ kN.m}$	$N_{Ed} = -173,72\text{ kN}$
пръстени – IPE 140, steel S235, 7 бр.		
Тегло на покривната конструкция – 28 058 kg		
Методика на EN 1993–4-2 [5]		
радиални греди – IPE270, steel S235, 48 бр.	$M_{Ed} = -41,55\text{ kN.m}$	$N_{Ed} = -125,53\text{ kN}$
пръстени - IPE 80, steel S235, 7 бр., поставени да носят покривната обшивка		
Тегло на покривната конструкция – 32 614 kg		

Таблица 3 Резервоар T111, Braakmanhaven, Netherlands

Обем $V = 40\,000\text{ m}^3$	Диаметър $D = 52,5\text{ m}$	Височина на корпуса $H = 20\text{ m}$
Радиус на огъване на сферичния купол – $R_r = 71,40\text{ m}$		
Методика на Е. Лессиг [2]		
радиални греди – IPE240, steel S355, 72 бр.	$M_{Ed} = 2,92\text{ kN.m}$	$N_{Ed} = -281,45\text{ kN}$
пръстени – IPE 180, steel S355, 12 бр.		
Тегло на покривната конструкция – 74 807 kg		
Методика на EN 1993–4-2 [5]		
радиални греди – IPE360, steel S355, 72 бр.	$M_{Ed} = -98,53\text{ kN.m}$	$N_{Ed} = -203,70\text{ kN}$
пръстени - IPE 80, steel S235, 12 бр., поставени да носят покривната обшивка		
Тегло на покривната конструкция – 107 657 kg		

Необходимо е да бъде отбелязано, че стоманените сечения, определени съгласно първата методика [2], са проверени чрез използване на подходящи програми, чрез които са създадени пространствени изчислителни модели.

При численото моделиране и изследване, при различни начални условия, са извършени множество независими решения. Те могат да бъдат обобщени в следните групи:

- геометрично-линейни решения, без отчитане на големи деформации;
- геометрично-нелинейни решения, с отчитане на големи деформации и P-D ефекти;
- анализ на конструкцията за загуба на устойчивост, с отчитане на геометричните несъвършенства, които са включени в модела като преместване 1/100 от отвора.

За разпределени товари по купола, които не се отклоняват много от вертикалната ос на симетрия, предварително определените спрямо [2] сечения, са напълно подходящи

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прецизното определяне на разрезните усилия в елементите на покривните куполи може да бъде извършено само чрез подходящи програми. Чрез тях могат да бъдат отчетени коравините на елементите и на възлите. Обичайно, преди това се извършва аналитично решение на купола, чрез което се определят напречното сечение и типа на елементите в него. След това аналитично определените елементи се въвеждат в пространствения числен модел. Различни аналитични методи могат да бъдат използвани. Един от тях е записан в [2] преди по-вече от 40 г. Той е добре известен в България. Друг метод е посочен в европейския стандарт EN 1993–4–2:2007 [5]. Тези 2-а метода имат различни концепции, уравнения и, разбира се, резултати.

Много инвеститори изискват описаната в EN 1993–4–2:2007 [5] методика да бъде следвана стъпка по стъпка, сякаш. При ребресто-пръстеновидни куполи, неговите елементи работят пространствено, съвместно, подпирайки се един други. За съжаление, методиката в [5] не отчита това. Като резултат се получават леки пръстени и тежки радиални греди, но сумата от техните тегла е по-голяма от тази, получена съгласно [2] и/или числени модели.

В този ред на мисли ние предлагаме да бъде записано в EN 1993–4–2:2007 [5], че показаната в него методика е подходяща за проектиране на сферични куполи, имащи само радиални греди. За ребресто-пръстеновидни куполи би следвало да се използва друга, по-подходяща методика.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Здравков Л. А., “Аналитично и числено оразмеряване на стоманени ребресто-пръстеновидни куполи”, 10th International scientific conference VSU’2010, Sofia.
- [2] Лессиг Е. Н. и др., “Листовые металлические конструкции”, Москва, 1970.
- [3] EN 1990:2003 Basis of structural design.
- [4] EN 1993-1-1:2005 Design of steel structures. General rules and rules for buildings.
- [5] EN 1993–4–2:2007 Design of steel structures. Tanks.