

СФЕРИЧЕН ПОКРИВ НА РЕЗЕРВОАР С ОБЕМ $V=70000 \text{ m}^3$

Любомир А. Здравков¹

„Адакта Проект 2006” – София

DOME ROOF OF ABOVEGROUND STEEL TANK WITH $V=70000 \text{ m}^3$ CAPACITY

Lyubomir A. Zdravkov

Abstract: *Dome roofs are most light structure to cover cylindrical tanks. When they are steel made they could not be used to cover serious spans, respectively big tanks.*

Author has checked the possibilities to use steel dome roof as cover of aboveground cylindrical tank with $V=70000 \text{ m}^3$ capacity and diameter $D=64 \text{ m}$. The investigation was made with appropriate 3D software. It is used nonlinear solution, accounting large displacements of steel structure for more accuracy.

Most serious problem is vagueness of snow distribution and combination of wind and snow loads.

Key words: *dome roof, radial girders, load combinations, nonlinear solution*

При едни и същи условия на експлоатация е възможно проектирането и използването на различни видове постоянни покриви – сферични, конични самоносещи или подпярни. При всяко от конструктивните решения количеството вложен метал и цената на съоръжението са различни.

Сферичните куполи са най-леките стоманени постоянни покриви с пълностенна конструкция. Те могат да работят при повишено вътрешно налягане, нямат конфликт с вътрешния плаващ покрив и не на последно място, не са необходими допълнителни фундаменти. Следователно винаги когато е възможно, е удачно да се прилагат сферични покриви.

Като недостатък на стоманените сферични куполи може да се посочи сравнително ограниченото им приложение. Смята се, че те не могат да премостват големи отвори, респективно да покриват резервоари с голям обем. До скоро най-големите резервоари със сферичен стоманен покрив в Европа бяха с вместимост $V = 40\,000 \text{ m}^3$.

В своята дейност като проектант, авторът беше помолен да провери възможността резервоар с обем $V = 70000 \text{ m}^3$ да бъде покрит със сферичен стоманен покрив. Резервоарът е за меласа и ще бъде изграден в Чехия.

Тази задача беше безспорно предизвикателство, която при положително решение би разширила областта на приложение на този клас съоръжения.

1. Основни геометрични характеристики на резервоара:

- диаметър на корпуса – $D = 64,0 \text{ m}$;
- височина на корпуса – $H_s = 22,0 \text{ m}$;
- максимално ниво на запълване – $H_t = 21,5 \text{ m}$;
- номинален обем на резервоара $V = 69165 \text{ m}^3$;
- радиус на сферичния купол – $R_r = 80,0 \text{ m} < R_{r,max} = 1,5 \cdot D = 96,0 \text{ m}$;
- „стрелка” на покрива – $f = 6,68 \text{ m}$;
- брой на покривните щитове / ребра – $n = 90$ бр.

2. Натоварване върху сферичния купол

- сняг – $S_n = 0,7 \text{ kN/m}^2$;
- свръхналягане – $p_0^n = 1,0 \text{ kPa}$;
- вакуум – $p_v^n = 0,5 \text{ kPa}$;

¹ Любомир Ангелов Здравков, д-р инж., „Адакта Проект 2006”, София 1606, ул. „Камен Андреев” N24, ет. 4, e-mail: L_Zdravkov@mail.orbitel.bg

- максимална скорост на вятъра – $v = 45 \text{ m/s}$;

Натоварването от вятър се изчислява по формулите:

$$(1) \quad w_m = \frac{v^2}{16} = 126,6 \text{ dN} = 1,266 \text{ kPa}$$

$$(2) \quad w_n = w_m \cdot k_z \cdot c = 1,0403 \text{ kPa} ,$$

където:

$k_z = 1,37$ е коефициент, отчитащ изменението на налягането по височина;

$c = 0,6$ – аеродинамичен коефициент, отчитащ формата и начина на обдухване на повърхнината.

3. Оразмеряване на елементите на покрива

3.1. Покривна обшивка

При приет брой на ребрата $n = 90 \rightarrow \hat{L} = \frac{\pi \cdot D}{n} = 2,234 \text{ m}$, където \hat{L} е разстоянието между ребрата

по дъгата на корпуса.

а) товарни комбинации за оразмеряване на обшивката

- перпендикулярно на обшивката натоварване, действащо отгоре надолу:

$$(3) \quad q_1 \downarrow = g_r \cdot \cos \alpha + \psi \cdot (S \cdot \cos \alpha + p_v)$$

- перпендикулярно на обшивката натоварване, действащо отдолу нагоре:

$$(4) \quad q_2 \uparrow = -g_r' \cdot \cos \alpha + \psi \cdot (w + p_0) ,$$

където:

$g_r = t_r \cdot \rho \cdot \gamma_f = 0,006 \cdot 78,5 \cdot 1,1 = 0,518 \text{ kN/m}^2$ - изчислително натоварване от собственото тегло на покривната обшивка с дебелина $t_r = 6 \text{ mm}$;

$g_r' = t_r \cdot \rho \cdot \gamma_f' = 0,006 \cdot 78,5 \cdot 0,9 = 0,424 \text{ kN/m}^2$ - изчислително натоварване от собственото тегло на покривната обшивка, когато то действа благоприятно;

$S = S_n \cdot \gamma_f = 0,7 \cdot 1,4 = 0,98 \text{ kN/m}^2$ - изчислително натоварване от сняг;

$p_0 = p_0^n \cdot \gamma_f = 1,0 \cdot 1,2 = 1,2 \text{ kN/m}^2$ - изчислително натоварване от свръхналягане;

$p_v = p_v^n \cdot \gamma_f = 0,5 \cdot 1,2 = 0,6 \text{ kN/m}^2$ - изчислително натоварване от вакуум;

$w = w_n \cdot \gamma_f = 1,0403 \cdot 1,4 = 1,456 \text{ kN/m}^2$ - изчислително натоварване от вятър;

$\psi = 0,8$ - коефициент на съчетание на 2-е кратковременни натоварвания;

α – ъгълът между хоризонталната равнина и допирателната към покрива в изследваната точка.

При разглеждане на обшивката като двустранно подпряно поле за действието на вертикални товари, огъващите моменти в нея се определят по формулите:

$$(5) \quad M_1 = \frac{1}{8} \cdot q_1 \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 1,673 \cdot 2,2^2 = 1,012 \text{ kNm}$$

$$(6) \quad M_2 = \frac{1}{8} \cdot q_2 \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 1,736 \cdot 2,2^2 = 1,05 \text{ kNm}$$

Огъващите моменти в (5) и (6) са определени за мястото на снаждане на покрива с корпуса, където $\alpha = 23,578^\circ$.

Минималната дебелина на обшивката се определя по израза:

$$(7) \quad t_r \geq \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\max}}{\gamma_c \cdot R_y}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 1,05}{1,215}} = 0,54 \text{ cm}$$

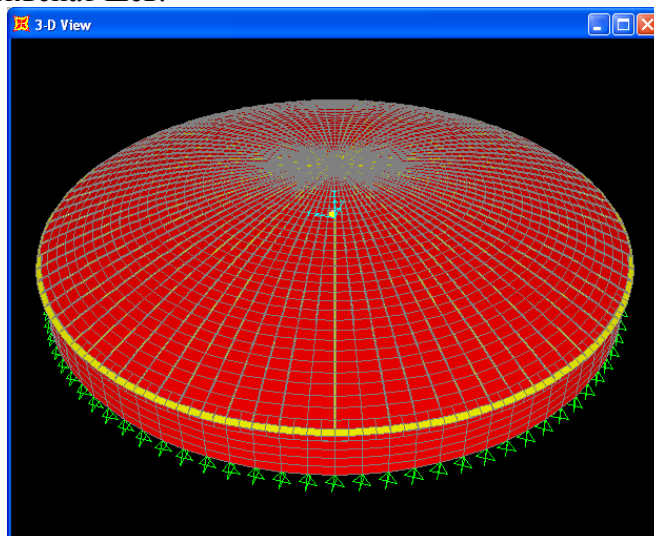
Дебелината на покривната обшивка от стомана S235е приета в следния порядък:

- $t_r = 6 \text{ mm}$ при разстояние между две съседни радиални греди $L = 1,8 \div 2,2 \text{ m}$;

- $t_r = 5 \text{ mm}$ при разстояние между две съседни радиални греди $L \leq 1,8 \text{ m}$.

3.2. Покривна конструкция

Компютърно е моделиран пространствен модел на покривния купол и последните два пояса на корпуса (фиг. 1). В мястото на снаждане на покрива с купола е разположен горният опорен пръстен (ГОП), който в случая е изработен от дебел стоманен лист. Покривната обшивка е свързана с ГОП чрез непрекъснат шев.



фиг. 1 Компютърен модел

Сечения на елементите на покрива са изследвани при контрол по усилия в елементите, с отчитане на р-Δ ефектите и геометрически нелинейното поведение на конструкцията. Натоварването е постепенно, с отчитане на въздействието от предходните товари.

3.2.1. Оразмеряване за експлоатационно състояние

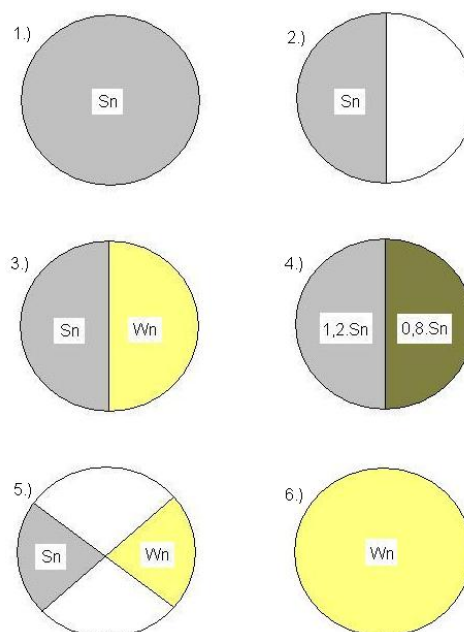
Разположението на товарите по покрива и тяхното комбиниране все още е неизяснен въпрос. В нашите норми [2] не се разглежда начина на разпределение на товарите по сферичен купол. Авторът допълнително е търсил предложения за възможни начини на разпределение в [1], [3], [4], [5], но там въпросът също е много слабо застъпен. Поради тази причина се наложило авторът да импровизира и да разчита на инженерното си чувство.

а) съчетание на товарите и разположението им по покрива

Схемите на прилагане на товарите, при които е направено изследването на сферичния купол е показано на фиг. 2.

Товарни комбинации:

- 1.) $1,1.G_n + 1,4.S_n + 0,8.(1,2.p_v^n)$
- 2.) $1,1.G_n + 1,4.S_n + 0,8.(1,2.p_v^n)$
- 3.) $1,1.G_n + 1,4.S_n + 1,4.w_n$
- 4.) $1,1.G_n + 1,4.(1,2.S_n + 0,8.S_n) + 0,8.(1,2.p_v^n)$
- 5.) $1,1.G_n + 1,4.S_n + 1,4.w_n$
- 6.) $0,9.G_n + 1,4.w_n + 0,8.(1,2.p_0^n)$
- 7.) $0,9.G_n + 1,2.p_0^n$



фиг. 2 Схеми на натоварване

б) получени са следните сечения на елементите на покривната конструкция:

- радиални ребра – IPE 220 по Euronorm 19-57 от стомана S235;
- ГОП – дебел стоманен лист с размери 32x600 mm от стомана S235;

Следните товарни комбинации са меродавни при оразмеряване на различните елементи:

- за ГОП – натоварване $0,9.G_n + 1,4.w_n + 0,8.(1,2.p_v^n)$, което предизвиква натиск в ГОП;
- за елементите на радиалните ребра меродавните комбинации са различни, в зависимост от разположението в план на товарите и конструкцията, но за голяма част най-неблагоприятната товарна комбинация е $1,1.G_n + 1,4.(1,2.S_n + 0,8.S_n) + 0,8.(1,2.p_v^n)$

в) деформации при експлоатационно състояние

Преместване Z в средата на купола, при изчислително натоварване:

$$\max Z \downarrow = 3,49\text{cm} - \text{при товарна комбинация } 1,1.G_n + 1,4.S_n + 0,8.(1,2.p_v^n)$$

$$\max Z \uparrow = 1,91\text{cm} - \text{при товарна комбинация } 0,9.G_n + 1,4.w_n + 0,8.(1,2.p_v^n)$$

3.2.2. Оразмеряване за монтажно състояние

За улеснение на монтажа на покрива изграждащите го елементи са обединени в щитове. Те се редят върху дъното на резервоара, паралелно с монтажа на първите пояси на корпуса. За спазване на проектната геометрия, в средата се поставя временна опора (фиг. 3), върху която стъпва единият край на щитовете.



фиг. 3 Временна опора при монтажа на покрива

След поставяне на всички щитове върху дъното и взаимното им свързване, в резервоара се подава вода, в резултат на което сферичният покрив започва да плува. Издигайки се нагоре той играе ролята на монтажна площадка.

Натоварването по отделните щитове, докато покривът се сглобява на дъното са:

- собствено тегло на конструкцията – G_n ;
- подвижен товар – $Q_n = 0,5 \text{ kN/m}^2$.

а) 1-и начин на подпиране

Покривните щитове са стъпили на 2-е опори (на дъното и върху опора в средата на резервоара)

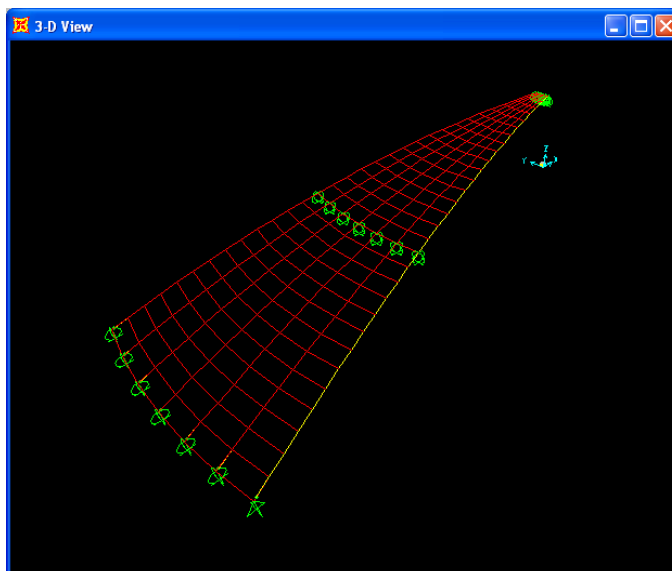
Радиални ребра IPE 270 от стомана S235 удовлетворяват якостните изисквания, но вертикалните премествания са много големи:

$$(8) \quad f_{\max} = 48\text{cm} < [f_u] = \frac{L}{200} = 16\text{cm}$$

Налага се поставяне на междинна опора под щитовете, докато покривът се сглобява.

б) 2-ри начин на подпиране

Покривните щитове са стъпили на 3-е опори (на дъното, върху опора в средата и междинна опора) (фиг. 4).



фиг. 4 Схема на подпиране на щитовете с междинни опори

Ребра IPE 240 от стомана S235 в щитовете удовлетворяват якостните изисквания. В този случай максималното вертикално преместване $f_{max} = 3,7 \text{ cm} < [f_u]$

4. Тегло на покривната конструкция

- радиални ребра IPE 240 по Euro norm 19-57 от S235 – 84 410 kg;
- ГОП – лист 32x600 mm от S235 – 30 305 kg;
- покривна обшивка от S235:
 - $t_r = 6 \text{ mm} - 58 700 \text{ kg};$
 - $t_r = 5 \text{ mm} - 81 450 \text{ kg};$
- централен пръстен от S235 – 6 130 kg

Общото тегло на покрива заедно с ГОП е $\sum G_r = 260995 \text{ kg}$, от което може да се получи средното количество метал за единица площ:

$$(9) \quad g_{r,m} = \frac{\sum G_r}{A_r} = \frac{260995}{3217} = 81,13 \text{ kg/m}^2$$

5. Изводи

5.1. Сферични стоманени покриви успешно могат да се прилагат при резервоари с диаметър на корпуса $D \leq 64 \text{ m}$, т. е. при вместимост $V \leq 70 000 \text{ m}^3$.

При повишените изисквания за намаляване на изпусканите в атмосферата пари, този тип покриви могат да работят както при повишено свръхналягане, така и с монтиран плаващ покрив вътре в резервоара. По този начин те се явяват като по-добра алтернатива на коничните несамонасеци покриви при голямогабаритните резервоари.

5.2. Много сериозен проблем е липсата на информация както за възможното разположение и натрупване на сняг по покрива, така и едновременното въздействие на сняг и вятър върху покрива.

5.3. За отделните конструктивни елементи на покрива най-неблагоприятната комбинация от товари е различна. Дори за едно радиално ребро от купола меродавната товарна комбинация се изменя по неговата дължина.

Обикновено за сферичния купол най-неблагоприятни са несиметричните в план натоварвания, при които той може да загуби устойчивост.

5.4. Често при определяне на сеченията на елементите меродавно се оказва монтажното състояние.

Литература:

1. Инструкция за проектиране на СВЦР с обем от 100 до 10 000 м³ за системата на енергетиката, Енергопроект, 1995.
2. Норми за натоварване и въздействия върху сгради и съоръжения, ДВ, бр. 92 от 2004 г.
3. Рекомендации по определению снеговой нагрузки для некоторых типов покрытий, ЦНИИСК им. Кучеренко, Москва, 1983 г.
4. API Std 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, Tenth Edition, Addendum 1÷4, December 2005.
5. 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, November 2004.