

Сферичен самоносещ покрив на резервоар с обем $V=70\,000\text{ m}^3$ Нови подходи за проектиране

Любомир А. Здравков

PhD, Associate Professor, Civil Engineer

University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Faculty of Civil Engineering, №1 "Hristo Smirnensky" str., floor 7, Sofia 1046, Bulgaria

e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg

A French company, in performance with program for expansion of its production, assigns design of tank for molasses with $V = 70\,000\text{ m}^3$ capacity and self-supporting dome roof. The tank will be erected in company's storage area, near to Dobrovice, Czech Republic, next to other two, the same tanks, with $V = 70\,000\text{ m}^3$ capacity. One of the requirements of Investor is to reduce weight of steel structure, especially weight of the roof. Main reason for that are very heavy sections, according to the point of view of Investor. That requirement forces design to be as light as possible, but on safe side. Of special interest is calculation of the elements of roof structure and possible new approaches to demonstrate their bearing capacity.

Keywords: *design, Laplace, roof cover plates, roof's structure, self-supporting dome roof*

1. Основни геометрични размери на резервоара

Диаметър на резервоара - $D = 64,0\text{ m}$;

Височина на корпуса - $H = 22,020\text{ m}$;

Височина ("стрелка") на покрива - $f = 5,49\text{ m}$

Радиус на огъване на сферичния покрив - $R_r = 1,5 \cdot D = 1,5 \cdot 64 = 96,0\text{ m}$;

Брой радиални греди (ребра) в покрива - $n_r = 100$ бр.;

радиални греди в зоната на централния пръстен - 20 бр.

По първоначален проект, по който покрива е изпълнен, радиалните ребра са със сечение ПР 220. Резервоарът, респективно неговия покрив са в експлоатация от няколко години.

Пръстеновидни елементи - няма, виж **фиг. 1.1**;

Дебелина на покривната обшивка - $t_r = 5\text{ mm}$;

Горен опорен пръстен - ъглов профил със сечение L200x12

Покривната конструкция и обшивката са изпълнени от стомана S355.



фиг. 1.1 - Стоманен резервоар с обем $V=70\,000\text{ m}^3$ за меласа

2. Натоварване върху сферичния покрив

Свръхналягане - $p_o = 5 \text{ mbar}$;

Подналягане (вакуум) - $p_v = 2,5 \text{ mbar}$;

Сняг в района на изграждане на резервоара (Dobrovice) - $s_k = 0,75 \text{ kN/m}^2$;

Натоварването от сняг s по покрива на резервоара се определя по формулата [2]:

$$(2.1) \quad s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,75 = 0,6 \text{ kN/m}^2,$$

където:

μ_i е коефициентът за натоварване от сняг по покрива, в зависимост от формата на последния;

C_e – коефициентът за изложение;

C_t – топлинният коефициент;

s_k – характеристичната стойност за натоварването от сняг върху земната повърхност.

Вятър - $v_{b,0} = 36,12 \text{ m/s}$;

Максимална стойност на скоростният напор $q_p(z)$ на вятъра на изчислителната височина z , отчитайки нарастването на ветровите товари по височина и специфичната форма, и размери на покрива, ще бъде определен съгласно стандарт EN 1991-1-4:2005 [3]:

$$(2.2) \quad q_p(z) = \left[1 + 7 \cdot I_v(z) \right] \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z), \text{ N/m}^2,$$

където:

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ - плътността на вятъра;

$v_m(z)$ - средна скорост на вятъра на височина z над нивото на терена;

$I_v(z)$ - интензивност на турбулентността, за височина над терена z .

Аеродинамичните коефициенти c_{pe} за определяне на стойностите на ветровото натоварване по различни точки на покрива се определят от фиг. 7.12 на EN 1991-1-4:2005, в зависимост от отношението на геометричните размери на резервоара h , d и f :

$$(2.3) \quad \left. \begin{aligned} \frac{h}{d} = \frac{22,02}{64} = 0,344 \\ \frac{f}{d} = \frac{5,49}{64} = 0,0858 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} c_{pe,A} = 1,35 \\ c_{pe,B} = 0,6 \\ c_{pe,C} = 0,4 \end{cases}$$

Налягането от вятъра w_e върху външните повърхности на сферичния купол, ще бъде със стойност:

$$(2.4) \quad w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe},$$

за т А $\rightarrow w_{e,A} = q_p(z_{e,A}) \cdot c_{pe,A} = 2346,95 \cdot 1,35 = 3168,4 \text{ N/m}^2$

за т В $\rightarrow w_{e,B} = q_p(z_{e,B}) \cdot c_{pe,B} = 2472,95 \cdot 0,6 = 1483,8 \text{ N/m}^2$

за т С $\rightarrow w_{e,C} = q_p(z_{e,C}) \cdot c_{pe,C} = 2346,95 \cdot 0,4 = 938,8 \text{ N/m}^2$

Усреднената характеристична стойност на ветровото натоварване $w_{e,m}$ по целия покрив на резервоара може да се определя съгласно формулата:

$$(2.5) \quad w_{e,m} = 0,30 \cdot w_{e,A} + 0,5 \cdot w_{e,B} + 0,20 \cdot w_{e,C} =$$
$$= 0,30 \cdot 3168,4 + 0,5 \cdot 1483,8 + 0,2 \cdot 938,8 = 1880,2 \text{ N/m}^2$$

3. Товарни комбинации

Комбинациите на товарите, действащи върху покрива, могат да бъдат обобщени до следните 2-е основни разновидности:

а) комбиниране на товарите, действащи отгоре надолу

$$(3.1) \quad q_1 = \gamma_{Fg,sup} \cdot g_n + \gamma_{Fs} \cdot s + \gamma_{Fv} \cdot \psi_{0,1} \cdot p_v = 0,6 \cdot 1,35 + 1,5 \cdot 0,6 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,25 = 1,935 \text{ kN/m}^2 \downarrow,$$

където:

g_n е характеристичната стойност за натоварване от собственото тегло на покривната конструкция и обшивка;

p_v - характеристичната стойност на подналягането (вакуума) в резервоара;

s - характеристичната стойност на натоварването от сняг по покрива. Определена е по (2.1);

$\gamma_{Fg,sup} = 1,35$ - коефициент за натоварване от собствено тегло покривна конструкция и обшивка, когато този товар действа неблагоприятно, съгласно EN 1990 [1];

$\gamma_{Fs} = 1,5$ - коефициент за натоварване от сняг;

$\gamma_{Fv} = 1,5$ - коефициент за натоварване от подналягане (вакуум);

$\psi_{0,1} = 0,6$ - коефициент за комбинация на 2-е или по-вече променливи въздействия, действащи едновременно, виж EN 1990 [1].

б) комбиниране на товари, действащи отдолу нагоре

$$(3.2) \quad q_2 = \gamma_{Fw} \cdot w_{e,i} + \gamma_{Fa} \cdot \psi_{0,1} \cdot p_o - \gamma_{Fg,inf} \cdot g_n \uparrow,$$

където:

$w_{e,i}$ е характеристичната стойност на ветровото натоварване по покрива;

p_o - характеристичната стойност на свръхналягането в резервоара;

$\gamma_{Fw} = 1,5$ - коефициент за натоварване от вятър;

$\gamma_{Fa} = 1,5$ - коефициент за натоварване от свръхналягане в резервоара;

$\gamma_{Fg,inf} = 1,0$ - коефициент за натоварване от собствено тегло покривна конструкция и обшивка, когато то действа благоприятно.

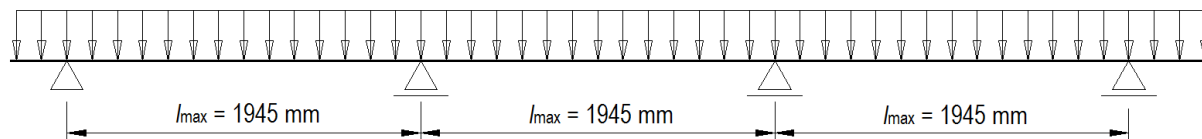
$$\text{за т А} \rightarrow q_{2,A} = \gamma_{Fw} \cdot w_{e,A} + \gamma_{Fa} \cdot \psi_{0,1} \cdot p_o - \gamma_{Fg,inf} \cdot g_n = 1,5 \cdot 3,168 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,5 - 1,0 \cdot 0,6 = 4,602 \text{ kN/m}^2 \uparrow$$

$$\text{средно} \rightarrow q_{2,m} = \gamma_{Fw} \cdot w_{e,m} + \gamma_{Fa} \cdot \psi_{0,1} \cdot p_o - \gamma_{Fg,inf} \cdot g_n = 1,5 \cdot 1,88 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,5 - 1,0 \cdot 0,6 = 2,67 \text{ kN/m}^2 \uparrow$$

4. Традиционен подход при оразмеряване на покривните елементи и резултати от него

а) покривна обшивка

Възприетата статическа схема на покривната ламарина е непрекъснатата греда на множество опори, както е показано на **фиг. 4.1**. Разстоянието между опорите е мерено там, където свършва триъгълното поле от обшивката, предаващо товарите към корпуса.



фиг. 4.1 – Статическа схема на покривната обшивка

В резултат от направеното изследване е приета дебелина на покривната обшивката е $t_{rp} = 5 \text{ mm}$ от стомана S355, колкото е и конструктивният минимум. Толкова е изпълнена и по проект.

б) покривна конструкция

Тъй като радиалните ребра, изграждащи купола са нецентрично натиснати, меродавна ще бъде изчислителната проверка за обща загуба на устойчивост. Изследваните радиални ребра са сечение IPE 330, от стомана S355. Тук е използван т.нар. Общ метод, макар и с някои изменения в него. Методът е разгледан в стандарт EN 1993-1-1 [4].

Чрез програмен продукт SAP 2000 е създаден пространствен изчислителен модел на купола, където е активирана опцията Buckling Analysis. Чрез тази опция е възможно да бъде определен запасът от носеща способност на конструкцията преди тя да загуби устойчивост, частично или цялостно.

Съгласно проведеното изследване, радиалните греди по покрива със сечение IPE 330 от стомана S355, не следва да загубят обща устойчивост. Очевидно полученият профил IPE 330 е многократно по-голям от заложения по проект профил IPE 220. Нещо по-вече - реализираният и намиращ се от няколко години в експлоатация сферичен покрив на резервоар $V = 70\,000 \text{ m}^3$ в

Dobrovice все още е във видимо добро състояние. Възможните опции за това разминаване в резултатите, са следните:

- временните товари вятър, сняг и вакуум, до този момент не са достигнали своите критични стойности, които биха разрушили сферичния покрив;
- нов подход при определяне на носещата способност на елементите, изграждащи покрива.

2-та опция ми се струва по-разумна. Все пак до проектиране на такива големи резервоари, с обем $V = 70\,000\text{ m}^3$, какъвто е разглежданият тук, не се допускат случайни фирми.

5. Нов подход в анализа и оразмеряването на елементите на купола

Анализирайки получените резултати, в мен започва да се очертава мнението, че класическите подходи при оразмеряване на пространствени куполи, каквито са покривите на резервоарите, са прекалено консервативни. Поради тази причина аз започнах да търся други, алтернативни подходи за анализ и оразмеряване на такъв тип конструкции.

а) оразмеряване на покривната обшивка като пространствена черупка

За покривната обшивка на резервоара, която би могла да бъде разгледана като тънкостенна черупка с постоянна дебелина, в сила е уравнението на Лаплас, имащо вида:

$$(5.1) \quad \frac{\sigma_m}{R_m} + \frac{\sigma_r}{R_r} = \frac{p}{t},$$

където:

σ_m е нормалното напрежение в меридианно направление, виж **фиг. 5.1**;

σ_r - нормалното напрежение в радиално (пръстеновидно) направление;

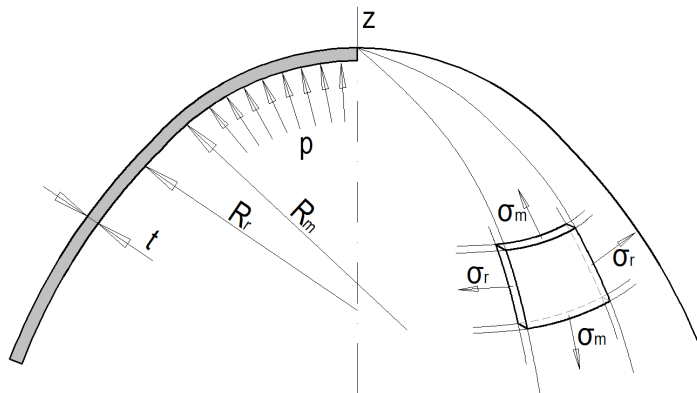
R_m - радиусът на кривина на меридианното сечение;

R_r - радиусът на кривина на пръстеновидното сечение;

p - стойността на налягането върху черупката, което може да бъде функция единствено на координатата z ;

t - дебелината на черупката.

Ограничение на уравнение (5.1) е, че то може да се използва при тънкостенни черупки, които могат да бъдат изследвани по безмоментовата теория.



фиг. 5.1 - Черупка ос на симетрия (на въртене) z и постоянна дебелина t

При сферични черупки, в които радиусът на кривина във всички сечения е един и същ, т.е. $R_m = R_r = R$, нормалните напрежения във всички направления ще бъдат еднакви. Те могат да бъдат определени по формулата:

$$(5.2) \quad \sigma_r = \sigma_m = \frac{p}{2t} \cdot R$$

От тук можем да получим минимално необходимата дебелина на покривната обшивка:

$$(5.3) \quad t \geq \frac{q_{2,m}}{2 \cdot (f_y / \gamma_{M0})} \cdot R_r = \frac{2,67}{2 \cdot (355000 / 1,05)} \cdot 96 = 0,0004\text{m} = 0,4\text{mm}$$

Вижда се, че разликата в необходимата дебелина на покривната обшивка, когато тя е разглеждана като корава плоча, работеща на огъване, и като гладка черупка, работеща на опън, е много голяма. В пъти. Дори ако оразмеряваме покривната обшивка с товарна комбинация $q_{2,A}$ за т.А, покривната обшивка пак ще се получи много икономична:

$$(5.4) \quad t \geq \frac{q_{2,A}}{2 \cdot (f_y / \gamma_{M0})} \cdot R_r = \frac{4,602}{2 \cdot (355000 / 1,05)} \cdot 96 = 0,00065m = 0,65mm$$

Следва да се отбележи, че при отчитане на работата на покривната обшивка като пространствена черупка при товарна комбинация $q_{2,i}$, радиалните ребра не са необходими, т.е. тяхната якостна проверка е удовлетворена автоматично.

Естествено, такъв подход за отчитане на работата на покривната обшивка като пространствена черупка е възможен, когато детайлите за свързване на изграждащите я елементи са подходящи. Например, покривните листове се съединяват помежду си чрез челни заваръчни шевове, изпълнени с пълно проваряване.

Определените по формула (5.4) минимални дебелини на обшивката t_{rp} не кореспондират със случаите на локално приложени концентрирани товари от хора и оборудване по покрива. В такъв случай покривните листове следва да бъдат оразмерявани като плочи, работещи на огъване извън тяхната повърхнина.

б) оразмеряване на покривната конструкция от радиални ребра за загуба на устойчивост - методика на Работната група за EN 1993-1-6 [5] за оразмеряване на сферични черупки

Предложената от [5] методика се отнася за гладки сферични черупки. За целта, ребрестата черупка на сферичния купол трябва да бъде превърната в еквивалентна гладка черупка, която да има същата огъвна коравина. Изхождайки от равенството между инерционните моменти на приведената покривна обшивка и радиалното ребро, получаваме:

$$(5.5) \quad \frac{1}{12} \cdot a_n \cdot t_{ek}^3 = I_0$$

и от тук:

$$(5.6) \quad t_{ek} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_0}{a_n}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 2772}{201}} = 5,49cm,$$

където:

a_n е разстоянието между радиалните ребра в мястото им на снаждане с корпуса на резервоара;

t_{ek} - еквивалентна (приведена) дебелина на покривната обшивка.

I_0 – общият инерционен момент на реброто и покривната ламарина с широчина a_n .

Тук, конкретно при това изследване, приносът на обшивката е пренебрегнат и приетата в (5.6) стойност за $I_0 = I_y = 2772 \text{ cm}^4$ е равна на инерционният момент на IPE 220.

За да е в сила предложената в [5] методика, трябва да е изпълнено следното условие:

$$(5.7) \quad 100 \leq \frac{R_r}{t_{ek}} \leq 3000,$$

$$\frac{R_r}{t_{ek}} = \frac{9600}{5,49} = 1748,6 < 3000 \rightarrow \text{разгледаната в [5] постановка може да бъде използвана}$$

Критичната стойност на приложеното налягане, в еластичен стадий, се определя чрез израза:

$$(5.8) \quad p_{r,cr} = \frac{2}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot C_c \cdot E \cdot \left(\frac{t}{R_r} \right)^2 = \frac{2}{\sqrt{3 \cdot (1 - 0,3^2)}} \cdot 0,7 \cdot 21000 \cdot \left(\frac{5,49}{9600} \right)^2 = 0,00582 \text{ kN/cm}^2,$$

където:

$C_c = 0,7$ е коефициент, отчитащ условията на опирание на черупката по нейната периферия;

$E = 21\,000 \text{ kN/cm}^2$ - модулът на еластичността на стоманата;

$t = t_{ek} = 5,49 \text{ cm}$ - еквивалентната дебелина на гладката сферична черупка;

$\nu = 0,3$ - коефициент на Poisson.

Критичната стойност на приложеното външно налягане, в пластичен стадий, би могло да бъде определено чрез израза:

$$(5.9) \quad p_{r,pl} = f_{y,k} \cdot C_{pl} \cdot \frac{t}{R_r} = 35,5 \cdot 0,9 \cdot \frac{5,49}{9600} = 0,0365 \text{ kN/cm}^2,$$

където:

$f_{y,k} = 35,5 \text{ kN/cm}^2$ е характеристичната стойност на границата на провлачане на стомана S355;
 $C_{pl} = 0,9$ - коефициент, отчитащ условията на опирание на черупката.

Амплитудата на характеристичното несъвършенство Δw_k се изчислява както следва:

$$(5.10) \quad \Delta w_k = \frac{1}{Q} \cdot \sqrt{R_r \cdot t} = \frac{1}{16} \cdot \sqrt{9600 \cdot 5,49} = 14,348 \text{ cm},$$

където:

Q е параметър, отчитащ качеството на производство. $Q = 16$ - нормално качество.

Коефициентът α_1 , отчитащ несъвършенствата, се изчислява по:

$$(5.11) \quad \alpha_1 = \frac{1}{1 + 1,90 \cdot (\Delta w_k / t)^{0,75}} = \frac{1}{1 + 1,90 \cdot (14,348 / 5,49)^{0,75}} = 0,2038$$

Коефициентът, отчитащ геометричните несъвършенства $\alpha_G = 0,70$.

Коефициентът на загуба на устойчивост α в еластичен стадий е в пряка зависимост от α_1 и α_G , и може да бъде определен чрез израза:

$$(5.12) \quad \alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_G = 0,2038 \cdot 0,70 = 0,1427$$

Приведената стройност $\bar{\lambda}$ се изчислява по формулата:

$$(5.13) \quad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{p_{r,pl}}{p_{r,cr}}} = \sqrt{\frac{0,0365}{0,00582}} = 2,504 > \lambda_0 = 0,20,$$

където:

$\lambda_0 = 0,20$ е гранична приведена стройност.

Условната стройност на черупката $\bar{\lambda}_p$ в пластичен стадий се изчислява чрез израза:

$$(5.14) \quad \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,1427}{1 - 0,7}} = 0,6897 < \bar{\lambda} = 2,504,$$

където:

$\beta = 0,70$ е коефициент на диапазона на пластичност;

$\eta = 1,0$ - експонент на взаимодействие.

От тук изчисляваме коефициента за загуба на устойчивост χ :

$$(5.15) \quad \chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} = \frac{0,1427}{2,504^2} = 0,0228$$

$$(5.16) \quad R_{pl} = \frac{p_{r,pl}}{p_{Ed}} = \frac{p_{r,pl}}{q_1} = \frac{0,0365 \cdot 100^2}{1,935} = 188,63 \text{ - в пластичен стадий}$$

$$(5.17) \quad R_{pl} = \frac{p_{r,cr}}{p_{Ed}} = \frac{p_{r,cr}}{q_1} = \frac{0,00582 \cdot 100^2}{1,935} = 30,08 \text{ - в еластичен стадий}$$

Коефициентът R_k , показващ колко пъти можем да завишим товарите, преди черупката да загуби устойчивост, характеристично, се определя по формулата:

$$(5.18) \quad R_k = \chi \cdot R_{pl} = 0,0228 \cdot 188,63 = 4,3$$

Изчислителната стойност на запаса на носеща способност R_d , е определена по-долу:

$$(5.19) \quad R_d = \frac{R_k}{\gamma_{MI}} = \frac{4,3}{1,05} = 4,095 > 1$$

От уравнение (5.19) следва, че покривният купол, изпълнен от 100 бр. радиални ребра IPE 220, разглеждан като еквивалентна гладка черупка, няма да загуби устойчивост при симетрични равномерно разпределени товари.

- методика на Вольмир [6]

С достатъчна за практиката точност, за сферични черупки с отношение $R_r / t = 400 \div 2000$ и централен вертикален ъгъл на купола $\theta = 2 \cdot \alpha_n = 40^\circ \div 120^\circ$ могат да бъдат определени критичните стойности q_{cr} на външното налягане, при което черупките ще загубят устойчивост. Формулата има вида:

$$(5.20) \quad q_{cr} = 0,3 \cdot k \cdot E \cdot \left(\frac{t_{ra}}{R_r} \right)^2$$

където:

$$(5.21) \quad k = \left(1 - 0,175 \cdot \frac{\theta^0 - 40^0}{40^0} \right) \cdot \left(1 - 0,07 \cdot \frac{R_r}{400 \cdot t_{ek}} \right) =$$

$$= \left(1 - 0,175 \cdot \frac{40^0 - 40^0}{40^0} \right) \cdot \left(1 - 0,07 \cdot \frac{9600}{400 \cdot 5,49} \right) = 0,694$$

$$q_{cr} = 0,3 \cdot k \cdot E \cdot \left(\frac{t_{ek}}{R_r} \right)^2 = 0,3 \cdot 0,694 \cdot 21000 \cdot \left(\frac{5,49}{9600} \right)^2 = 0,00143 \text{ kN/cm}^2 = 14,3 \text{ kN/m}^2$$

$$q_1 = 1,935 \text{ kN/m}^2 \quad \left. \vphantom{q_{cr}} \right\} \Rightarrow q_{cr} > q_1$$

Според използваната методика на Вольмир [6], сферичната черупка на купола не следва да загуби устойчивост при товарна комбинация q_1 .

- методика, описана в "Справочник проектировщика" [7]

Съгласно тази методика, критичните стойности q_{cr} на външното налягане, при което сферичните черупки ще загубят устойчивост, се определят чрез израза:

$$(5.22) \quad q_{cr} = \frac{E \cdot t^4}{R^4} \cdot \left[K_1 \cdot \frac{f}{t} \left(K_2 \cdot \frac{f^2}{t^2} + 1 \right) + K_3 \cdot \sqrt{\left(K_4 \cdot \frac{f^2}{t^2} - 1 \right)^3} \right] =$$

$$\frac{21000 \cdot 5,49^4}{3200^4} \cdot \left[1,52 \cdot \frac{5,49}{5,49} \left(0,00576 \cdot \frac{5,49^2}{5,49^2} + 1 \right) + 0,407 \cdot \sqrt{\left(2,07 \cdot \frac{5,49^2}{5,49^2} - 1 \right)^3} \right] =$$

$$= 0,22213 \text{ kN/cm}^2 = 2221 \text{ kN/m}^2$$

където:

t е дебелината на черупката;

R - радиусът на кръглата основа на сферичната черупка;

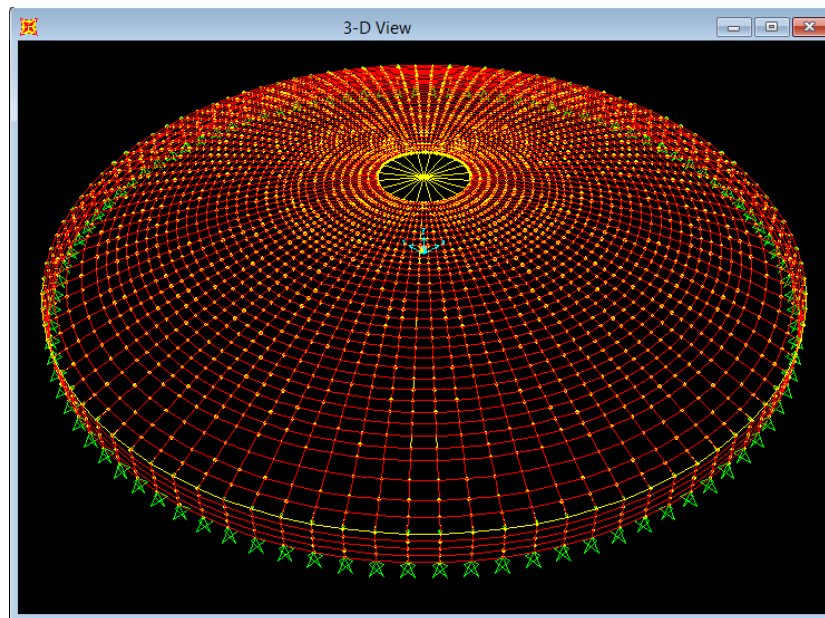
f - височината ("стрелката") на купола;

K_1, K_2, K_3, K_4 - коефициенти, зависещо от условията на подпиране на сферичната черупка.

Сравнявайки стойностите на товарите в комбинация q_1 и критичните стойности на външните товари q_{cr} , определени по формула (5.22) следва, че черупката не трябва да загуби устойчивост. Следва да се отбележи, че получените според тази методика стойности на q_{cr} се получават нереално големи.

6. Определяне на разрезните усилия в радиалните ребра IPE 220, когато покривната обшивка е натоварена с товарна комбинация $q_2 \uparrow$

С цел определяне на разрезните усилия в надлъжните ребра IPE 220, както и тяхното влияние върху тънката стоманена обшивка, е създаден пространствен изчислителен модел, използвайки програмен продукт SAP 2000 v.14.2. В този модел са включени всички конструктивни елементи на покрива - радиални ребра, покривна обшивка, централен пръстен и горен опорен пръстен, виж **фиг. 6.1**.



фиг. 6.1 - Модел на купола, в който е включена и обшивката

В отделни точки по дължината на радиалните ребра са отчетени стойностите на разрезните усилия и е направена якостна проверка за достатъчност на сеченията:

$$M_{\max} = -18,779 \text{ kN.m}$$

$$N_c = +63,391 \text{ kN}$$

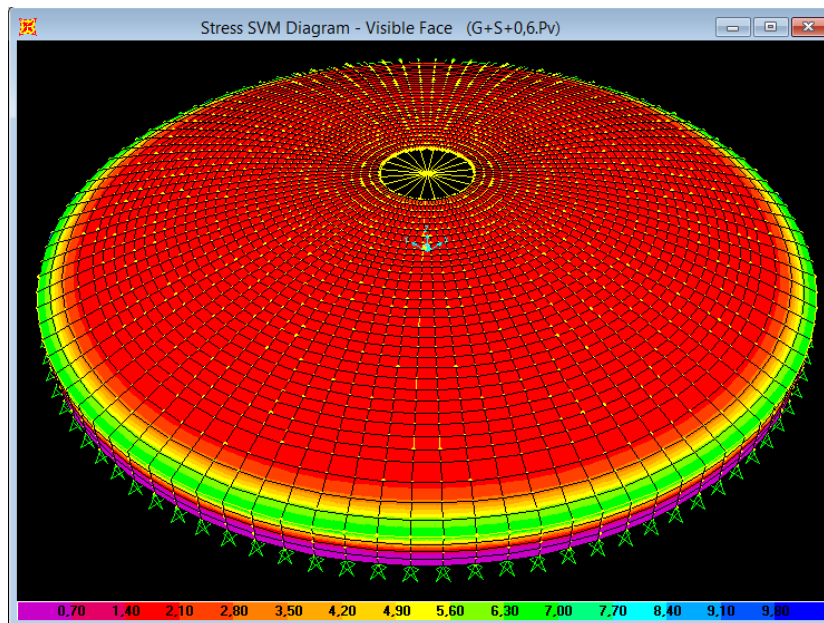
$$\sigma_{\max} = \frac{63,391}{33,4} + \frac{18,779 \cdot 100}{285} = 8,49 \text{ kN/cm}^2 < \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{35,5}{1,05} = 33,81 \text{ kN/cm}^2$$

$$N_{\max} = +98,64 \text{ kN}$$

$$M_c = -13,438 \text{ kN.m}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{98,64}{33,4} + \frac{13,438 \cdot 100}{285} = 7,67 \text{ kN/cm}^2 < \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{35,5}{1,05} = 33,81 \text{ kN/cm}^2$$

При анализ на напреженията в покривната обшивка от товарна комбинация $q_2 \uparrow$, виж **фиг. 6.2**, се вижда, че наличието на радиални ребра **IPE 220** на практика не променя безмоментното напрегнато състояние на обшивката, т.е. използването на уравнението на Лаплас, посочено в **(5.1)**, има своето основание.



фиг. 6.2 - Нормални напрежения по von Mises в покривната обшивка, kN/cm²

7. Изводи

Самоносещите сферични стоманени куполи са изградени от конструкция и обшивка. Когато тези елементи са надеждно свързани, куполите биха могли да бъдат разглеждани като пространствени гладки черупки. И към тях да се прилагат методиките и анализите на редица изследователи, работили върху черупките. В резултат, при отчитане на пространствената работа на обшивката и на конструктивните елементи, може съществено да се намали вложеното количество стомана.

Основният недостатък на този подход е, че всички изследователи, респективно нормативни документи, разглеждат само случаи на равномерно разпределени товари. А снегът по покрива, обдуван от вятър, може да се премества, да се натрупва, при което натоварването става несиметрично, т.е. по-неблагоприятно.

От друга страна, европейските норми за натоварване от сняг EN 1991-1-3:2006 [1] не разглеждат случай на неравномерно натоварване по сферични куполи.

Литература:

1. EN 1990:2002, Основи на проектирането на строителни конструкции
2. EN 1991-1-3:2006, Основни въздействия. Натоварване от сняг.
3. EN 1991-1-4:2005, Основни въздействия. Натоварване от вятър.
4. EN 1993-1-1:2005, Проектиране на стоманени конструкции. Общи правила и правила за сгради.
5. Evolution Group for EN 1993-1-6. Summary of Amendments to EN 1993-1-6:2007 for 2013.
6. Вольмир А. С., Гибкие пластинки и оболочки. Техтеоретиздат, 1956.
7. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Под редакцией проф. д-р А. А. Уманского, Издание второе. Москва, 1973.