

ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА САМОНОСЕЩ РЕБРЕСТО – ПРЪСТЕНОВИДЕН КУПОЛ,
ПОКРИВ НА РЕЗЕРВОАР T016, La Reunion, France

Любомир А. Здравков¹

Университет по Архитектура, Строителство и Геодезия – София

DESIGN OF SELF – SUPPORTING DOME WITH RADIAL GIRDERS AND CIRCULAR
ELEMENTS, ROOF OF TANK T016, La Reunion, France

Lyubomir A. Zdravkov

University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy

Abstract: *The concerned spatial dome with radial girders and circular elements is roof on tank T016 in La Reunion, France. The roof is self-supporting, supported only on the shell of the tank. Sections of dome roof are designed on two independent ways – manual and FEA analysis are performed. Controlling company, „Bureau Veritas”, did not approve our design methods and it was necessary to make additional, nontraditional analysis of roof structure.*

Key words: *cylindrical steel tank, self-supporting dome roof, radial girders, rings, effective length, buckling analysis*

За La Reunion и Martinique, Франция, са проектирани група вертикални стоманени цилиндрични резервоари, в които ще се съхраняват нефтопродукти. Всички конструктивни изчисления по резервоарите са предавани за проверка и одобрение първоначално на възложителя, а след това – на контролната фирма „Bureau Veritas”.

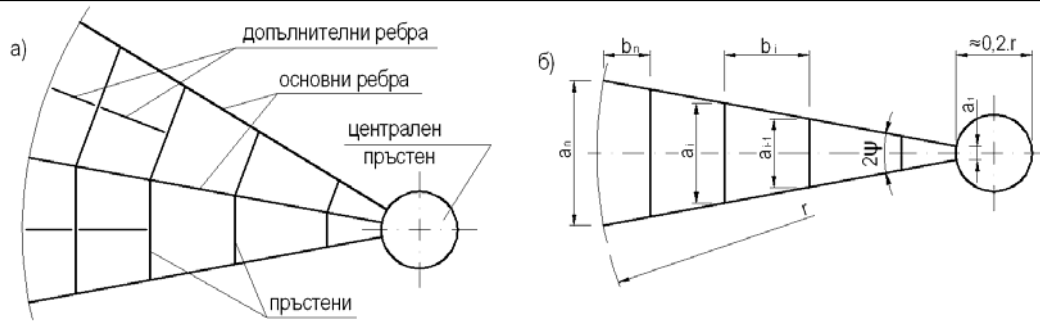
Една от отправените към нас забележките е, че приетите от нас изключвателни дължини на радиалните ребра не са верни. Препоръчано ни беше да приемем изчислителни дължини, равни на половината диаметър на резервоара, както е посочено в [4], но което изискване противоречи на показаната в [1] методика. Това наложи да бъде извършен допълнителен, по-нетрадиционен анализ, чрез който да бъде доказано, че покривите са проектирани правилно и ще могат да понесат товарите по тях.

1. Въведение

Покривната конструкция, независимо от нейния вид, се състои от радиални елементи (ребра), пръстеновидно разположени елементи (пръстени) и покривна обшивка (Фиг. 1).

Разположението и броя на радиалните ребра и пръстените до голяма степен се определят от изчисляването и оразмеряването на обшивката.

¹ Любомир Ангелов Здравков, гл. ас. д-р инж., УАСГ, София 1046, бул. „Христо Смирненски” №1, корпус «Б», ет. 7, каб. 733, e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg



фиг. 1 Ребрен скелет на покрива
 а) основни елементи б) изчислителна схема

Като пример за извършеното оразмеряване по групата резервоари се разглежда ребресто-пръстеновиден купол, покрив на стоманен цилиндричен резервоар T016 в **La Reunion**, Франция. Покривът е сферичен, самоносещ, със следните характеристики:

- диаметър на кръглата основа (диаметър на корпуса на резервоара) – $D = 36$ m;
- радиус на сферата (по тежестната ос на радиалните ребра) – $R_r = 48$ m;
- стрелка на купола – $f = 3,50$ m;
- брой на радиалните ребра – $n_b = 48$ m;
- брой на междинните пръстени по покрива – $n_r = 7$;
- покривната обшивка с дебелина $t_r = 5$ mm не е заварена за конструкцията на покрива.

2. Натоварване върху сферичния покрив.

Когато покривната обшивка не е заварена за конструкцията на покрива и по него няма натоварване от сняг, какъвто е този случай, изчисляването на покрива на резервоара в условия на експлоатация се извършва само за една комбинация от натоварване. При нея се получава сумарният товар q_1 , който действа отгоре надолу:

$$(2.1) \quad q_1 = g_n \cdot \gamma_{Fg,sup} + Q_n \cdot \gamma_{FQ} + \psi_0 \cdot \gamma_{FV} \cdot p_v^n \downarrow,$$

където:

g_n е характеристичната стойност за натоварване от собствено тегло;

$Q_n = 1 \text{ kN/m}^2$ – характеристичната стойност на натоварването от подвижен товар по покрива на резервоара. Приет е минимумът, който се изисква по [3];

$p_v^n = 0,5 \text{ kN/m}^2$ - характеристичната стойност на подналягането в резервоара;

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

$\gamma_{FQ} = 1,5$ - коефициент за натоварване от подвижни товари по покрива;

$\gamma_{FV} = 1,5$ - коефициент за натоварване от подналягане (вакуум) в резервоара

$\psi_0 = 0,8$ - коефициент за съчетание на 2-те кратковременни натоварвания [2].

Във формула (2.1) не се отчита натоварването от технологичното оборудване, тъй като то нормално е във вид на концентрирани сили, чието действие е локално.

3. Ръчно оразмеряване на елементите на постоянни покриви.

3.1. Оразмеряване на покривната обшивка

Покривната ламарина се изчислява на огъване като корава правоъгълна пластина, свободно подпряна на корави опори и натоварена перпендикулярно на средната и равнина.

3.2. Оразмеряване на елементите на покривната конструкция за монтажно състояние.

При самоносещи щитови покриви, по време на монтажа основното ребро е опряно на корпуса и на временна централна стойка. От действието на монтажните товари върху поставения в проектно положение щит, в реброто възникват усилия, които често превишават тези от експлоатационно състояние.

3.3. Оразмеряване на радиалните ребра и на пръстените на купола за експлоатационно състояние.

Ребресто-пръстеновидните куполи са многократно статически неопределими пространствени системи, чиито усилия трудно могат да бъдат определени чрез решение на ръка. Точното изчисляване на елементите на носещата конструкция на купола се извършва чрез използване на подходящ софтуер, с отчитане коравината на елементите и податливостта на връзките.

Предварително определяне на сеченията на елементите на сферичен ребресто-пръстеновиден купол, които ще бъдат заложи в изчислителния пространствен числен модел, може да се извърши на базата на ставно-прътова система. Методиката е подробно разгледана в [1], така че тук не е необходимо да се спирам на нея. Нейна особеност е, че изкълчвателната дължината на елементите съвпада с геометричната (Фиг. 2).

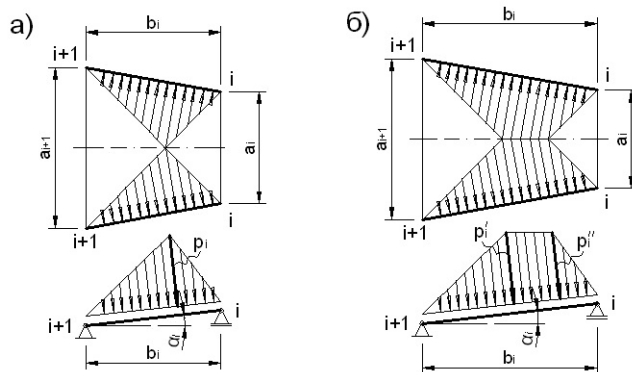
4. Числено оразмеряване на елементите на покривната конструкция

4.1. Изчислителен модел

За анализ е използван програмният продукт SAP 2000 Nonlinear v.14. Чрез него е създаден тримерен изчислителен модел на сферичния купол. В този модел като прътови елементи са въведени радиалните ребра и пръстеновидните елементи, с реалните им геометрични характеристики и материали. Сеченията им са получени от предварителното ръчно решение по описаната в [1] методика. Радиалните ребра са от горещовалцувани профили IPE220, а пръстеновидните елементи имат сечение IPE140. Използвана е стомана S235, с характеристики, посочени в стандарт EN 10025., а именно:

- граница на провлачане – $f_y = 235 \text{ MPa}$;
- якост на опън – $f_u = 470 \text{ MPa}$;
- модул на еластичността – $E = 210\,000 \text{ MPa}$;
- плътност – $\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$

С не голяма грешка, радиалните ребра описват кривата на купола чрез полигон, между чиито възли елементите са прави. Пръстеновидните елементи са завъртени спрямо надлъжната си ос, така че техният горен пояс да тангира към повърхнината на купола.

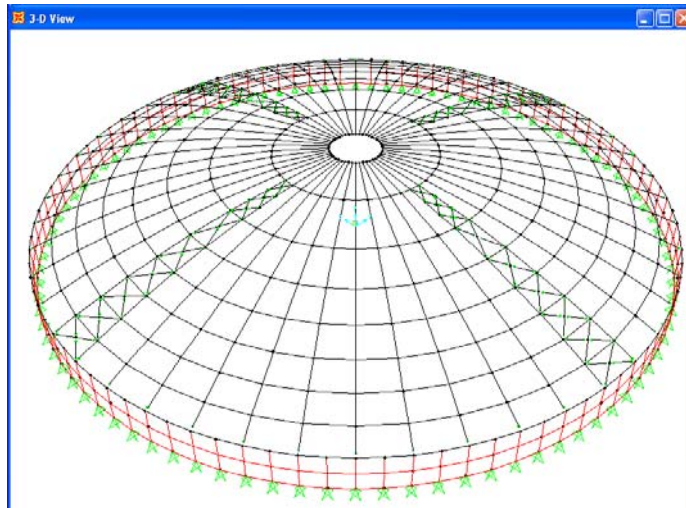


фиг. 2 Схема за натоварване на ребрата
а) с триъгълников товар б) с трапецовиден товар

За да не се получават грешни резултати, при компютърния анализ на купола е препоръчително обшивката да не се въвежда като конструктивен елемент.

Предаването на натоварването върху конструкцията се симулира чрез товарни площи, съгласно **Фиг. 2**. Натоварването от вакуум е перпендикулярно на главните инерционни оси на прътовите елементи, а натоварването от собствено тегло и подвижни товари е по посока на земното притегляне.

За да се отчете деформативността на опорите на купола в хоризонтална посока, освен радиалните ребра и пръстеновидните елементи, допълнително са моделирани горен опорен пръстен (ГОП) и част от цилиндричен стоманен корпус (**Фиг. 3**).



фиг. 3 Пространствен числен модел на сферичния купол

4.2. Подходи за числен анализ на сферичния купол

При проведения числен анализ на сферичния купол, за доказване на неговата носеща способност са извършени няколко независими решения, при различни начални условия.

4.2.1. Геометрически линейно решение без отчитане на големи деформации

Усилията в елементите на купола се определят при геометрически линейна постановка. Стоманата работи в еластичен стадий. Товарните комбинации като вид отговарят на (2.1), но е необходимо да се отбележи, че подвижният товар Q не е равномерно разпределен, а въздейства на различни зони от купола, за да се намери най-неблагоприятното му положение.

Целта на това изследване е да се проверят получените чрез ръчното решение стоманени профили на радиалните ребра и на пръстеновидните елементи.

Изкълчвателните дължини на елементите са равни на разстоянията между точките на пресичане ребро – пръстен, така, както е посочено в [1].

4.2.2 Геометрически нелинейно решение с отчитане на големи деформации

Усилията в елементите на купола се определят при геометрически нелинейна постановка, с отчитане на големи деформации. Стоманата работи в еластичен стадий.

Първият действащ върху купола товар е този на собственото тегло g_n , въведен при недеформирана конструкция. Всички останали товари са въведени при деформирана от собственото тегло g_n конструкция. Товарите по покрива като вид и разположение са същите, както при т.4.2.1.

Целта на този нелинеен анализ е да се определи дали решението е сходящо. Ако то е такова, деформативността на системата от приложените товари не е прекомерна, следователно куполът не губи обща устойчивост.

Характерен детайл при това решение е, че най – големи вертикални деформации се получават не в средата на покрива, а в средата на ребрата, т.е. в четвъртините.

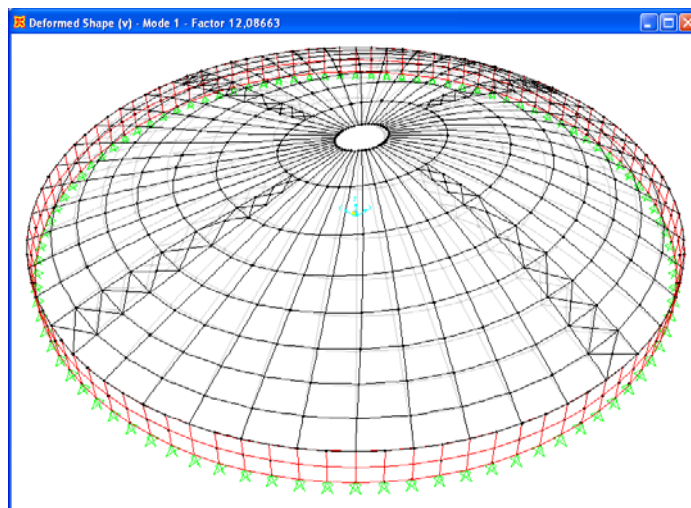
4.2.3. Анализ за загуба на устойчивост на конструкцията, с отчитане на геометрическите несъвършенства, които са 1/100

Използвана е опцията Buckling Analysis в SAP 2000. Тя дава възможност да се изследва доколко елемент или цяла конструкция имат запас на носимоспособност, преди да загубят обща устойчивост. Решението се извършва в линейна постановка, но с отчитане на деформациите в стоманения купол, предизвикани от товари по него.

Първоначално, при геометрически нелинейна постановка е въведен товар от собствено тегло g_n на конструкцията. След това, при деформирана от g_n схема, е въведено и натоварване от вакуум p_v^n , за когото е необходимо да се определи запаса от носеща способност, преди конструкцията да загуби устойчивост. Товарите от собствено тегло g_n и вакуум p_v^n са въведени с техните характеристични стойности.

С цел отчитане на геометрическите несъвършенства в покривния купол, още по време на неговото моделиране, всички негови елементи са транслирани хоризонтално по ос x , поетапно. Всеки пръстен, заедно с всички други, с по-малък радиус пръстени, е транслиран на разстояние $\Delta_x = 1/100$ от разстоянието между 2-а съседни пръстена.

При това решение е характерно, че макар да имаме симетрично натоварване от собствено тегло g_n и вакуум p_v^n , ребресто-пръстеновидният купол губи устойчивост под несиметрична форма (Фиг. 4)



фиг. 4 Деформирана схема на купола при загуба на устойчивост от натоварване от собствено тегло g и вакуум p_v^n

При приложен товар от собствено тегло g_n , коефициентът на запас от носеща способност от товар вакуум p_v^n е $k_f = 12,08663$.

5. Резултати

Товарите от собствено тегло g_n и вакуум p_v^n са въведени с техните характеристични стойности. При натоварването на покрива сумарното равномерно разпределено натоварване от

подвижен товар $Q_n = 1,0 \text{ kN/m}^2$ не е включено. За да отчетем неговото влияние е необходимо да се направят няколко елементарни преобразувания. В резултат се получава:

$$(5.1) \quad k_{r,Q}^n = k_f \cdot \frac{N_g^n + N_v^n}{N_g^n + N_v^n + 2 \cdot N_v^n} = 12,0866 \cdot \frac{36,150 + 26,185}{36,150 + 3 \cdot 26,185} = 6,568 \text{ - при } \Delta_x = 1/100,$$

където:

N_g^n е осовото усилие в крайните радиални елементи от натоварване с характеристикните стойности на постоянните товари g_n от собствено тегло ;

N_v^n - осовото усилие в крайните радиални елементи от натоварване с характеристикните стойности на вакуум p_v^n в резервоара.

Получените стойности за коефициента $k_{r,Q}^n$ са определени при характеристикни стойности на товарите. За да получим общият коефициент k_f на запас на носимоспособност от изчислителни товари, подходът е аналогичен:

$$(5.2) \quad k_{r,Q} = k_{r,Q}^n \cdot \frac{N_g^n + N_v^n + 2 \cdot N_v^n}{N_g^n \cdot \gamma_{F,g} + (N_v^n + 2 \cdot N_v^n) \gamma_{F,Q}} = 6,568 \cdot \frac{36,150 + 3 \cdot 26,185}{36,150 \cdot 1,35 + 3 \cdot 26,185 \cdot 1,5} = 4,521 \text{ - при } \Delta_x = 1/100$$

Сферичният ребресто – пръстеновиден покрив на резервоар Т016 може да бъде претоварен $k_{r,Q} = 4,521$ пъти от изчислителните стойности на товари от вакуум и подвижен товар, преди да загуби обща устойчивост.

6. Заключение

От изчислителните модели, използвайки SAP 2000, не беше възможно да се изведе аналитична зависимост, чрез която да се определят изкълчвателните дължини на радиалните ребра във вертикалната равнина. Установи се само, че тези дължини са по-малки от половината диаметър на резервоара. Но чрез извършеният Buckling Analysis беше доказано нещо друго, по – важно – стоманеният ребресто – пръстеновиден покрив на резервоар Т016 има немалък запас от носеща способност и няма да загуби обща устойчивост. Откъдето за този конкретен случай би могло да се направи следният извод:

При този стоманен ребресто – пръстеновиден сферичен купол, при които обшивката не е заварена за покривната конструкция и не се очакват значителни несиметрично разположени товари от сняг и вятър, традиционната методика, разгледана в [1] и пренесена в компютърните модели, дава достатъчно достоверни резултати.

Посочените в [4] изчислителни изисквания за приемане на изкълчвателните дължини на радиалните ребра биха били в сила, ако в покривната конструкция няма радиални пръстени или тяхната работа не се отчита.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ЛЕССИГ Е. Н. и др., Листовые металлические конструкции, Москва, 1970
- [2] НАРЕДБА №3 за основните положения за проектиране на конструкциите на строежите и за въздействията върху тях, в сила от 16.04.2005 г
- [3] API Std 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, 2001
- [4] EN 1993-4-2: Design of Steel Structures, Part 4-2: Tanks, February 2007