

В. О. Попов¹
А. В. Попова²
Ван Вей³

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТОНКОСТІННИХ КУПОЛІВ З ПОЛІКАРБОНАТУ ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

¹Вінницький національний технічний університет, Україна

²Донецький національний університет імені Василя Стуса, Україна

³Цзюцюаньський професійно-технічний коледж, Китай

У статті набув подальшого розвитку метод розрахунку тонкостінних купольних систем без стаціонарного фундаменту. Виконано ґрунтовий аналіз принципового конструктивного рішення безкаркасних збірно-розбірних сферичних куполів з полікарбонату, який використовують сучасні світові виробники цих споруд. Виконано стислий опис безмоментної теорії роботи сферичних оболонок, який адаптовано стосовно полікарбонатних куполів. Розглянуто спрощену аналітичну модель напружено-деформованого стану сферичної оболонки діаметром екватора до 5 м під дією кліматичних впливів для подальшої верифікації деталізованих моделей. Розроблено високо деталізовані скінчено-елементні моделі куполів різних розмірів з урахуванням технологічних прорізів та конструктивних елементів жорсткості (опорного кільця та дверної рами) під дією вітрових, снігових, ожеледних та інших кліматичних впливів. Виявлено ділянки з найбільшими внутрішніми напруженнями від різних навантажень та характер деформування споруди.

Окремо розглянуто питання втрати стійкості форми, положення та рівноваги тонкостінної сферичної оболонки, як легкої тимчасової споруди. Доведено, що найгіршим впливом для конструкцій куполу, виходячи з критерію стійкості, є вітровий вплив. Визначено оціночну величину аеродинамічної підйомної сили від вітрових впливів, що діє на куполи. Доведено, що підйомна сила набагато більша за стабілізуючу власну вагу тонкостінного куполу. Розрахунками виявлено, що безкаркасний сферичний купол з полікарбонату від дії вітрових навантажень неминуче втрачає стійкість рівноваги і потребує розкріплення анкерами. Запропоновано раціональний спосіб анкерування конструкції куполу на тимчасових земляних майданчиках з використанням геошурупів або металевих гвинтових паль. Виявлено залежність між радіусом кривизни сферичного куполу та раціональною товщиною полікарбонату виходячи з критеріїв жорсткості та міцності. Сформульовано конструктивні рекомендації щодо раціонального проектування купольних систем з полікарбонату. Розроблений технологічний регламент з подальшої безпечної експлуатації куполів, а також, окреслено напрямки подальших наукових досліджень за цією тематикою.

Ключові слова: геодезичний купол, монолітний полікарбонат, напружено-деформований стан, кліматичні впливи, меридіональні та кільцеві напруження, втрата стійкості.

Вступ

Ця наукова робота узагальнює результати досліджень з аналітичної оцінки міцності, стійкості і довговічності малорозмірних збірно-розбірних безкаркасних тонкостінних куполів діаметром до 5,0 м з полікарбонату, які можуть використовуватися, як малі архітектурні форми, тимчасові торговельно-розважальні павільйони, теплиці, світло і радіо прозорі оболонки-накриття для військових потреб.

Геодезичні куполи, як каркасні стрижневі системи були запатентовані у середині ХХ сторіччя. Їх сферична форма володіє надзвичайно високою архітектурною виразністю. Тому геодезичні куполи з обшивкою та без обшивки з кінця минулого сторіччя широко використовуються за кордоном для різних громадських потреб. В Україні геодезичні куполи почали з'являтися протягом останнього десятиріччя. Основними вітчизняними виробниками на сьогодні є фірми Ecorod, Cupol-Space (м. Івано-Франківськ), ПП «Кедр» (м. Київ), ТОВ «PromoZR» (м. Запоріжжя), ТОВ «Авіліон» (м. Харків).

Тонкостінні сферичні куполи є частинним випадком будівельних оболонок. У закордонній інженерній практиці геодезичні куполи з металевим каркасом покривають світлопрозорим покриттям: тентом, закаленим склом, монолітним полікарбонатом [1]. З теорії розрахунку будівельних конструкцій оболонок відомо, що внутрішні зусилля у елементах, що виникають від тимчасових кліматичних навантажень, як каркасних так безкаркасних тонкостінних куполів, малі, у порівнянні з несучою здатністю конструкцій куполу. Тому і постає можливість побудови цих просторових систем з мінімальними витратами матеріалів.

На цей час монолітний полікарбонат не достатньо поширений в Україні через свою високу вартість, хоча, у всьому світі він завоював значний сегмент ринку світлопрозорих матеріалів [2]. Хоча і там монолітний полікарбонат, саме, як конструкційний матеріал, використовується вкрай рідко. Цей матеріал рекомендований, як замітник скла у відповідальних місцях, таких, як покриття навісів над громадськими будівлями, панорамні конструкції, світлопрозорі фасадні системи. Розрізняють армовані

і неармовані полікарбонати. Армований монолітний полікарбонат, володіє надзвичайно високими міцнісними характеристиками (співставні з металом). Межа міцності при розтязі складає 40 ... 80 МПа. Модуль пружності – близько 1,5 ... 3 ГПа [3].

З огляду на закордонний досвід, особливості роботи тонкостінних куполів під навантаженням пропонується виготовляти геодезичні куполи без каркасу за комірчастою (сотовою) технологією, суміщаючи для полікарбонатних листів несучі та огорожувальні функції. Це рішення досить рідко використовується у вітчизняній будівельній практиці. Наукові публікації за напрямком раціонального проектування полікарбонатних купольних систем без каркасу на сьогодні відсутні, хоча на ринку України ці споруди існують, і вже 3 ... 5 років пропонуються фірмами LuxDome, ТОВ «Завод М8 Сіті» та ASE Myrplanetarium. Куполи цих виробників складаються з тонкостінної оболонки, яка в основі спирається на опорне кільце з нержавіючої сталі трубчастого профілю. В зоні проходу улаштовується дверна рама з нержавіючої сталі. Для аерації внутрішнього простору часто в елементах луски передбачають додаткові технологічні прорізи (рис. 1).



Рисунок 1 – Загальний вигляд полікарбонатного куполу фірми ASE Myrplanetarium, як тимчасового павільйону-накриття на відкритому майданчику.

Основна частина

Інженерний досвід сучасних виробників куполів свідчить, що товщина луски (соти) елементів сферичного куполу (t) набагато менше його габаритних розмірів (радіуса кривизни, R), $R / t < 750$. Тому куполи, як тонкостінні сферичні оболонки, у першому наближенні можна розраховувати за безмоментною теорією, умовами застосування якої є: плавність зміни товщини оболонки, радіуса кривизни її меридіана, інтенсивності навантаження; вільне переміщення оболонки в радіальному та кільцевому напрямках.

Прийнята за основу аналітична модель куполу, яка достатньо точно описує напружено деформований стан реальної споруди без віконних та дверних прорізів, показана на рис. 2.

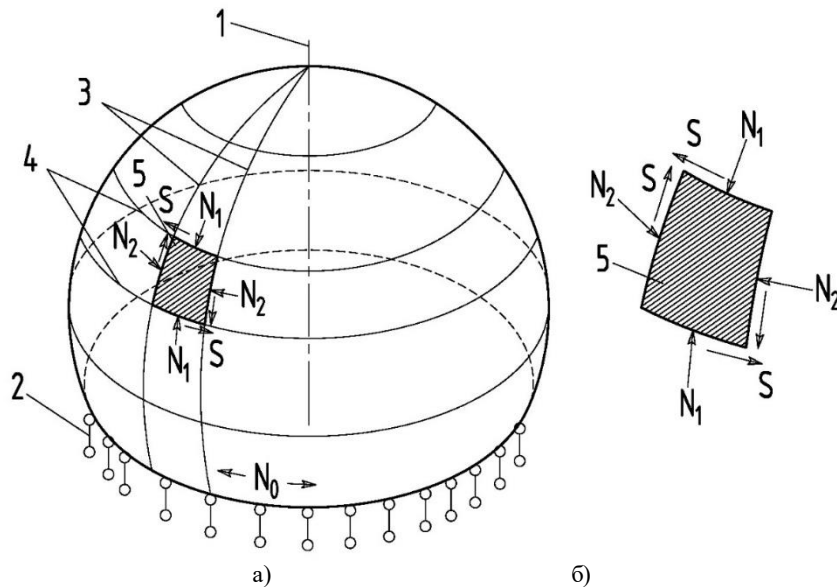


Рисунок 2 – Спрощена схема сферичної оболонки (без урахування дверних і віконних прорізів): а – загальний вигляд, б – одиничний фрагмент. Тут: 1 – вісь симетрії; 2 – шарнірно рухомі опори; 3 – меридіональні перерізи; 4 – кільцеві перерізи; 5 – нескінченно малий розрахунковий фрагмент.

Методика розрахунку куполу полягає у визначенні напружень у довільних точках оболонки (меридіональних та кільцевих), визначенні коефіцієнта запасу стійкості форми, рівноваги, положення; визначенні деформацій.

Напруження у куполі залежать від типу куполу та виду навантаження. Навантаження на сферичну оболонку можуть бути осе симетричними (сніг, ожеледь) та не осе симетричної (вітер, вітер при ожеледі). При відношенні $f / D > 1/4$ вітровий напір створює на поверхні купола підйомну силу, яка розвантажує купол [3 – 4].

Тому легкі полікарбонатні куполи без стаціонарного фундаменту необхідно перевіряти розрахунком на дію підйомної сили вітру (впливає на стійкість положення, стійкість від перекидання).

Еквівалентні напруження в елементах оболонок за безмоментною теорією, визначаються за [3 – 5]:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2}, \text{ [МПа]}. \quad (1)$$

За умови, що дотичні напруження малі, у порівнянні з нормальними, осеві напруження $\sigma_y = \sigma_o$ та кільцеві напруження $\sigma_x = \sigma_k$, співвідношення (1) набуває вигляду:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_o^2 + \sigma_k^2 - (\sigma_k \cdot \sigma_o)^2}, \text{ [МПа]}. \quad (2)$$

Безмоментне обпирання купола на основу показано та рис. 3. При цьому тонкостінна сферична оболонка – статично визначена.

У безмоментному напруженому стані оболонка купола працює, як тонка мембрана. У її довільних, нескінченно малих фрагментах діють нормальні зусилля. Це стосується всієї площі оболонки, окрім опорного перерізу та перерізів поблизу віконних та дверних прорізів, де можуть з'являтися згинальні моменти.

Розглянемо купол довільного контуру, подвійна кривизна якого у кожній точці визначається двома радіусами кривизни R_1 і R_2 . У загальному випадку нескінченно малий фрагмент (елемент) оболонки купола, обмежений двома меридіональними та двома кільцевими перерізами, знаходиться під впливом нормальних зусиль – меридіонального N_1 та кільцевого N_2 , а також дотичного зусилля S , віднесених до одиниці довжини перерізу.

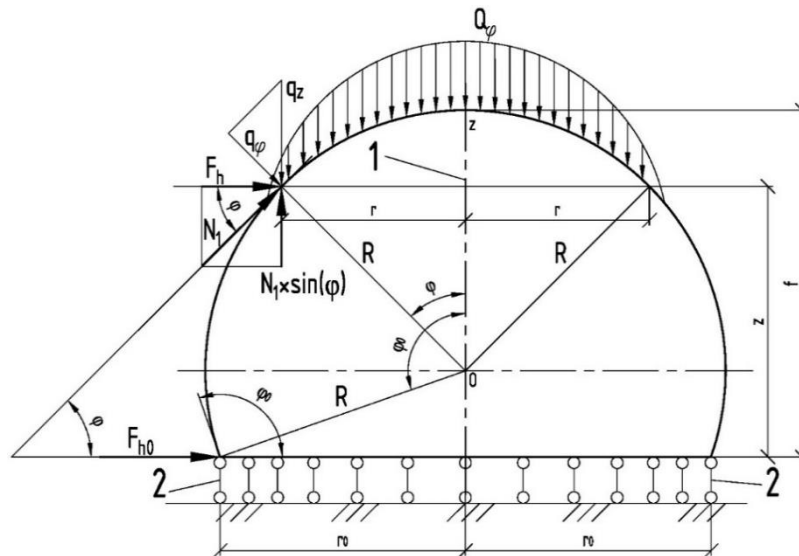


Рисунок 3 – Переріз сферичної оболонки. Тут: 1 – вісь симетрії, 2 – шарнірно рухомі опори.

При завантаженні купола осе симетричним навантаженням (власна вага, сніг, ожеледь на всій поверхні) зусилля $S = 0$, а зусилля N_1 та N_2 , [кН/м], визначають з умов статичної рівноваги, як функції лише кутової координати φ (широти). Погонні зусилля N_1 та N_2 пов'язані з осьовими та кільцевими напруженнями співвідношеннями: $\sigma_y = \sigma_o = N_1 / t$; $\sigma_x = \sigma_k = N_2 / t$.

Напружений стан купола при осе симетричному навантаженні, згідно з [4] характеризується рівнянням рівноваги (3):

$$\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} = q_\varphi, \quad (3)$$

де q_φ – нормальна до поверхні купола складова зовнішнього навантаження q (на 1 м^2 поверхні купола).

Для визначення меридіонального зусилля N_1 кільцевим горизонтальним перетином відсікається верхня частина купола та розглядається її рівновага. На відсіченій сегмент діє стискаюча сила Q_φ , яка є сумою всіх навантажень, прикладених вище аналізованого перерізу. Виходячи з умови $\Sigma Z=0$, вона повинна врівноважуватись меридіональними зусиллями N_1 по периметру кільцевого перерізу радіуса r :

$$Q_\varphi - N_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sin \varphi = 0, \quad (4)$$

де φ – поточна кутова координата (відраховується від осі обертання); $r = R_2 \cdot \sin(\varphi)$.

Отже, $N_1 = Q_\varphi / (\sin \varphi \cdot 2 \cdot \pi \cdot r) = Q_\varphi / (2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot \sin^2 \varphi)$.

Кільцеве зусилля N_2 слід знаходити з рівняння: $N_2 = (q_\varphi - N_1 / R_1) \cdot R_2$.

Розпір купола визначається як горизонтальна проекція меридіонального зусилля N_1 :

$$F_h = N_1 \cdot \cos \varphi = Q_\varphi \cdot \text{ctg} \varphi / (2 \cdot \pi \cdot r), \quad (5)$$

Розпір у рівні опорного кільця при $\varphi = \varphi_0$:

$$F_{h,0} = N_{1,0} \cdot \cos \varphi_0 = Q_{\varphi,0} \cdot \text{ctg} \varphi_0 / (2 \cdot \pi \cdot r_0), \quad (6)$$

де $N_{1,0}$ – меридіональне зусилля в рівні опорного кільця; φ_0 – половина центрального кута дуги оболонки в меридіональному напрямку (див. рис. 3); r_0 – радіус опорного кільця; $Q_{\varphi,0}$ – навантаження, що діє на купол.

Розпір F_h діє на опорне кільце в радіальному напрямку, тому зусилля, що впливає на опорне кільце:

$$N_0 = F_{h,0} \cdot r_0 = N_{1,0} \cdot r_0 \cdot \cos \varphi_0 = Q_{\varphi,0} \cdot \text{ctg} \varphi_0 / (2 \cdot \pi_0).$$

Під дією вертикального навантаження елементи сферичної оболонки у меридіональному напрямку, частково, стиснуті, частково, розтягнуті. Існує нейтральний кільцевий переріз (паралель), вздовж якої зусилля N_2 дорівнюють нулю. Координата нейтральної паралелі визначається формою купола та видом

навантаження. Її можна вирахувати, прирівнявши до нуля вираз у дужках у формулі $N_2 = (q_\varphi - N_1 / R_1) \cdot R_2 = 0$.

Оскільки сферична оболонка має сталий радіус кривизни у двох напрямках $R_1 = R_2 = R$, розрахункові формули набувають вигляду (7) та (8):

$$N_1 = Q_\varphi / (2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin^2 \varphi); \quad (7)$$

$$N_2 = q_\varphi \cdot R - N_1. \quad (8)$$

Математичні розрахунки засвідчують, що кут φ , при якому кільцеві зусилля N_2 в куполі змінюють знак, перетворюючись зі стискаючих на розтягувальні, дорівнює $\sim 52^\circ$ при дії власної ваги і 45° – при повному сніговому навантаженні.

При дії горизонтальних сил (вітер, сейсміка) і несиметричних навантажень (одностороннє розташування снігу), напружений стан купола характеризується, крім нормальних зусиль N_1 і N_2 , також дотичні (зсувні) зусиллями S . Розрахунок істотно ускладнюється і його виконують за спеціальною чисельною методикою.

Особливу увагу слід приділяти збереженню сферичними оболонками стійкості форми, положення та рівноваги. Стійкість сферичної форми можна наближено оцінити за [5], формула (14.22), дивись співвідношення (9):

$$\frac{\sigma \cdot \gamma_n}{\sigma_{cr} \cdot \gamma_c} \leq 1, \text{ де} \quad (9)$$

$\sigma = p \cdot R / (2 \cdot t)$ – розрахункові напруження, p – загальний зовнішній корисний тиск;
 $\sigma_{cr} = 0,1 \cdot E \cdot t / R$ – критичні напруження у оболонці при втраті стійкості форми.

Для дослідження поведінки геодезичних безкаркасних куполів з технологічними прорізами під дією кліматичних навантажень було вибрано три дискретних розміри реальних сферичних полікарбонатних куполів діаметром в рівні екватору $D_1 = 3,6 \text{ м}$, $D_2 = 4,2 \text{ м}$ та $D_3 = 4,8 \text{ м}$, висотою, відповідно, $h_1 = 2,4 \text{ м}$, $h_2 = 2,8 \text{ м}$ та $h_3 = 3,2 \text{ м}$, тривимірна модель яких зображено на рис. 4. Характеристики матеріалу оболонки (полікарбонату) прийняті у відповідності до технічної інформації виробника та [6] (модуль пружності $E_{нк} = 2,3 \text{ ГПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,37$, межа міцності при розтязі $\sigma_e = 65 \text{ МПа}$. Термін експлуатації споруди у зібраному стані, згідно з паспортом виробника – 8 років. Моделі розроблені за принципом можливих переміщень методом скінчених елементів за допомогою програмного комплексу «Lira-Windows». Моделі являють собою просторові системи, що складається із пластинчатих елементів, які моделюють роботу поверхні купола та стрижневих елементів, які моделюють роботу опорного кільця та рами вхідної групи. Елементи, що не підвищують міцність і жорсткість сферичних куполів, а саме, конструкції дверного заповнення та технологічне устаткування, змодельовані у вигляді корисного навантаження. Коефіцієнти надійності вибрані згідно з [8] для класу наслідків (відповідальності) СС-1 (незначні наслідки).

Товщина (t) пластинчастих скінчених елементів поверхні купола попередньо прийнята у відповідності до проектних рішень виробника. Власна вага конструкцій тонкостінної сферичної оболонки прикладена програмою автоматично з відповідними коефіцієнтами запасу, які враховують збільшення ваги куполу за рахунок монтажних метизів та збільшення ваги куполу за рахунок монтажних напусків, $\gamma_{fg} = 1,2$.

Міцнісні та жорскісні характеристики пластинчастих елементів моделі прийняті з урахуванням піддатливості з'єднань через можливе зміщення елементів луски один відносно одного за рахунок різниці діаметрів монтажних метизів і отворів. Згідно з рекомендаціями науково-методичної літератури це доцільно робити коригуванням загального модуля пружності матеріалу. Тому, у розрахунках, розрахунковий короточасний модуль пружності пластинчастих елементів Куполу $E_k = 0,7 \cdot E_{нк} = 1,61 \text{ ГПа}$. Крок дискретизації пластинчастих моделі $\approx 50 \dots 150 \text{ мм}$.

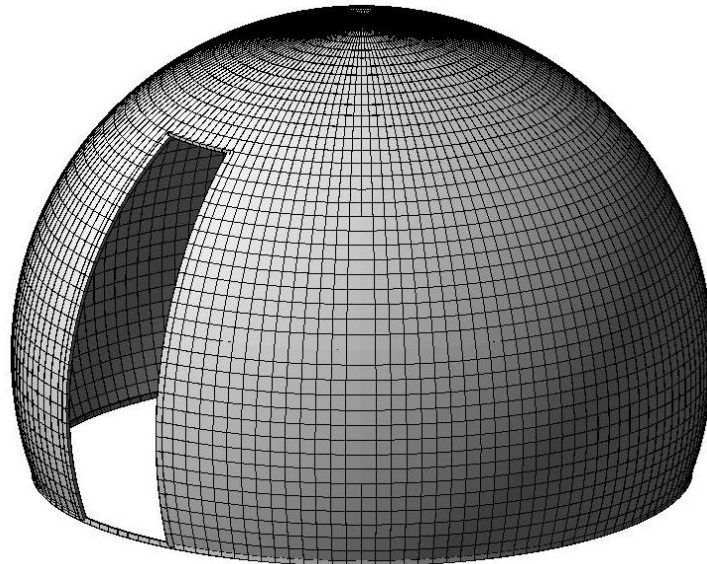


Рисунок 4 – Тривимірні-скінчено елементна модель купола з урахуванням прорізів.

А) Навантаження від вітру зібране у відповідності до [9]. Прийнятий граничний вітровий район встановлення – 3. Граничне розрахункове вітрове навантаження згідно з [9, с.24]:

$$W_m = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C \text{ [кН/м}^2\text{]}, \quad (10)$$

де $W_0 = (0,4 \dots 0,5) \text{ кПа}$ (1 ... 3 вітровий район); $\gamma_{fm} = 0,64$ – коефіцієнт надійності за граничним значенням вітрового навантаження (приймаємо за терміном експлуатації згідно з паспортом виробників – 8 років); тип місцевості I (можливе встановлення споруди на відкритій місцевості). C – коефіцієнт, що визначається за формулою (11):

$$C = C_{aer} \cdot C_h \cdot C_{alt} \cdot C_{rel} \cdot C_{dir} \cdot C_d. \quad (11)$$

У формулі (11) C_h – коефіцієнт висоти споруди [9, табл. 9.02]. Оскільки споруди, що досліджуються, висотою не більше 5 м, $C_h = 1,4$; коефіцієнт географічної висоти $C_{alt} = 1$ оскільки $H < 0,5 \text{ км}$, $C_{dir} = 1$ – коефіцієнт напрямку; $C_{rel} = 1$ – коефіцієнт рельєфу для рівнинної місцевості; $C_d = 1$ – коефіцієнт динамічності згідно зі змінами № 1 до [9].

Для знаходження аеродинамічного коефіцієнта сферичного купола слід визначити число Рейнольдса: $Re = 0,88 \cdot d \cdot \sqrt{W_0 \cdot C_h \cdot \gamma_{fm}} = (67 \dots 97) \cdot 10^5 > 4 \cdot 10^5$.

Аеродинамічний коефіцієнт, що визначається згідно з рис. 5 та [9, табл. 4]: $C_{aer} = C_e = (+1,0 \dots -1,25)$.

Б) Снігові навантаження. Нормативна вага снігового покриття на 1 м^2 згідно з розділом 8 [9] для 1 ... 4-го району за сніговим тиском $S_0 = 0,8 \dots 1,4 \text{ кПа}$. Граничне розрахункове значення снігових впливів на покрівлю розраховуємо згідно з (12):

$$S_m = \gamma_{fm} \cdot S_0 \cdot C \text{ [кПа]}, \quad (12)$$

У формулі (12) $C = C_e \cdot C_{alt} \cdot \mu$. Згідно з додатком Ж [9, с.55 – 56] застосована схема снігового впливу – за варіантом 1 (рис. 6, а). Покрівля куполів згідно з керівництвом з експлуатації виробників, не експлуатована, тобто $C_e = 1$. Коефіцієнт географічної висоти $C_{alt} = 1$. Коефіцієнт $\mu = \cos(1,8 \cdot \alpha)$. Звідси, для довільної точки сферичної оболонки $C = \cos(1,8 \cdot \alpha)$.

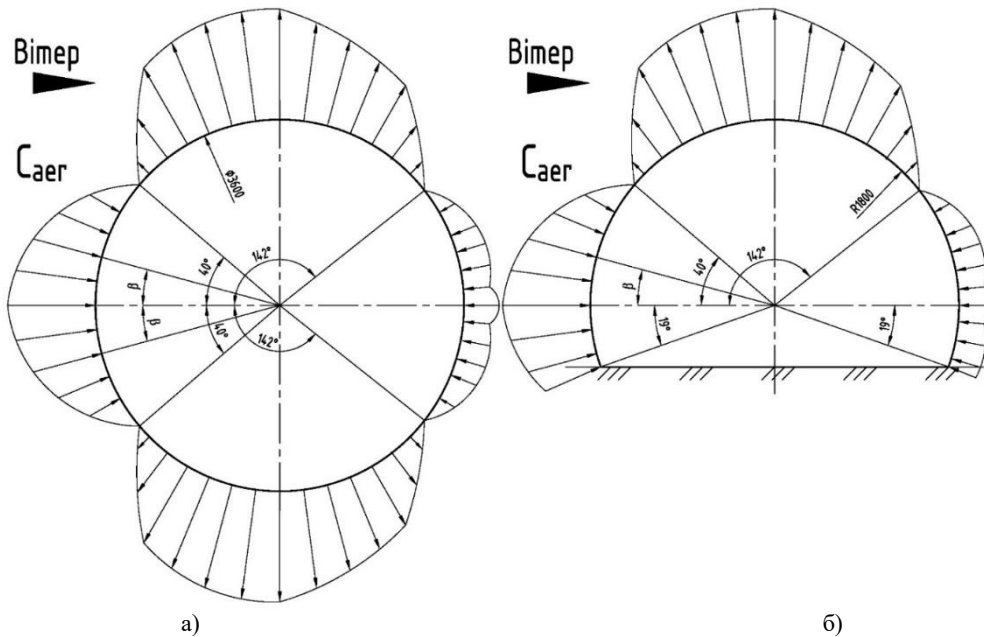


Рисунок 5 – Схема, що ілюструє розподіл аеродинамічних коефіцієнтів для знаходження вітрового тиску на сферичну оболонку діаметром 3,6 м: а – в плані, б – по вертикалі.

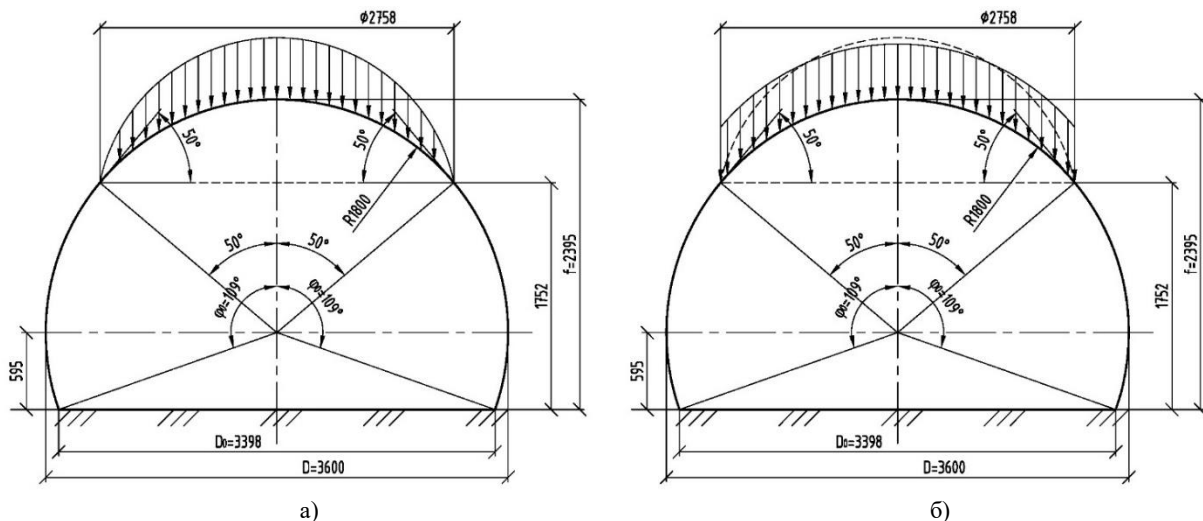


Рисунок 6 – Схема прикладання снігового впливу на купол діаметром 3,6 м: а – згідно [4], б – спрощена, що прикладалася до скінчено-елементної моделі.

Інші кліматичні впливи зібрані згідно [9]. Перевірка несучої здатності і стійкості конструкцій виконана відповідно до діючих нормативних документів [1, 5, 8 – 10] та методики, наведеної у [3, 7, 11]. В результаті перебору можливих комбінацій навантажень для безкаркасного куполу встановлено дві найбільш невідповідні комбінації навантажень, виходячи з мов міцності, стійкості і жорсткості. Комбінація № 1 – постійні навантаження, граничне значення снігових і ожеледних впливів. Комбінація № 2 – постійні навантаження, граничне значення навантажень від вітру.

Аналітичними розрахунками встановлено, що результуюча зсуваюча сила від горизонтальної проекції вітрового впливу для куполів діаметром екватору до 5,0 м, з урахуванням підйомної аеродинамічної сили у два – три рази більше за стабілізуючу силу тертя спокою, причому, чим більше купол, тим більша ймовірність втрати стійкості положення. Це саме стосується і підйомної сили, яка може привести до перекидання куполу (втрата стійкості рівноваги). Тому куполи, як тимчасові павільйони, вимагають обов'язкового розкріплення анкерними елементами.

Вибірка результатів високо деталізованого моделювання методом скінчених елементів напружено-деформованого стану сферичної оболонки діаметром екватору 3,6 м з урахуванням прорізів, елементів жорсткості та інших конструктивних елементів показані на рис. 7 – 12.

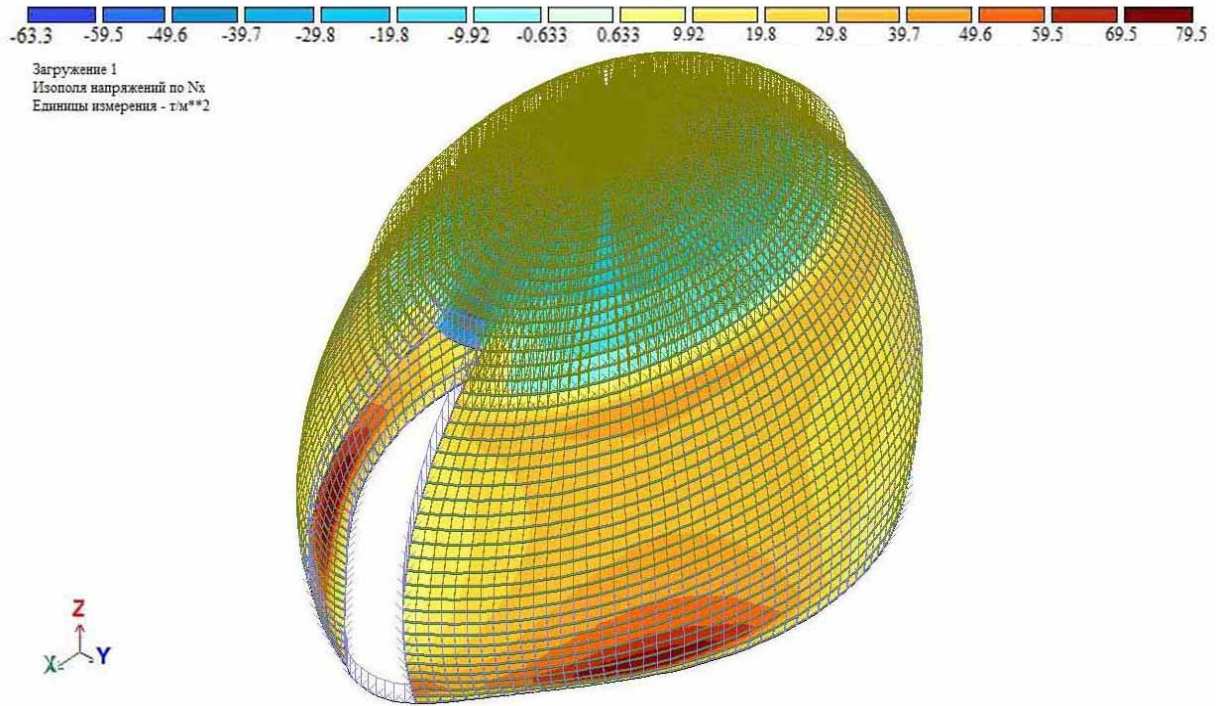


Рисунок 7 – Кільцеві напруження N_x , т/м², у елементах сферичної оболонки діаметром екватора 3,6 м від навантажень за невігідною комбінацією №1.

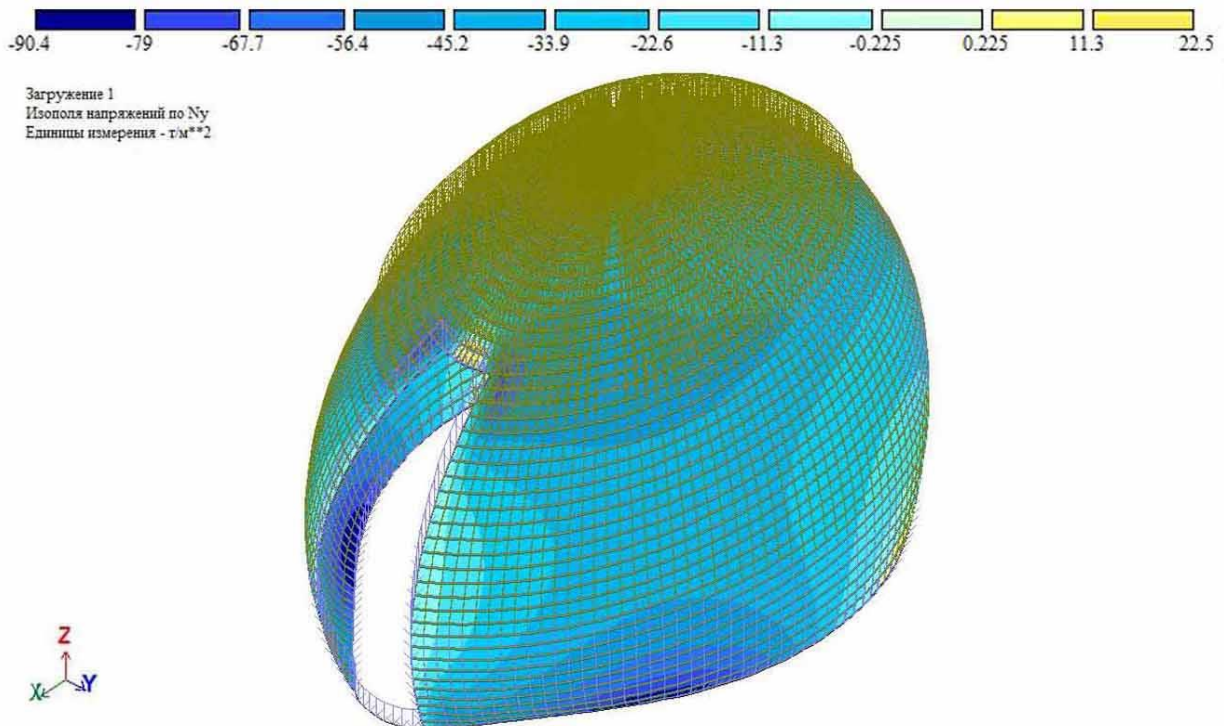


Рисунок 8 – Меридіональні напруження N_y , т/м², у елементах оболонки діаметром екватора 3,6 м від навантажень за невігідною комбінацією №1.

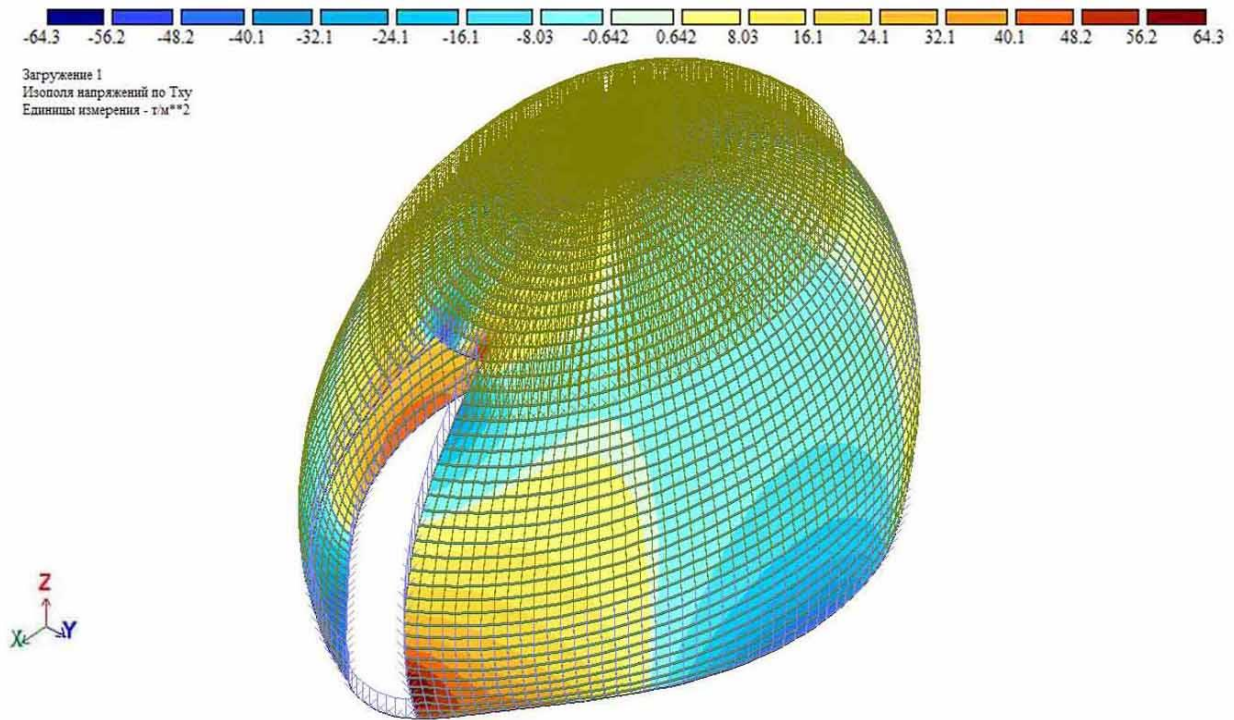


Рисунок 9 – Дотичні напруження T_{xy} , т/м², у елементах оболонки діаметром екватора 3,6 м від навантажень за невігідною комбінацією №1.

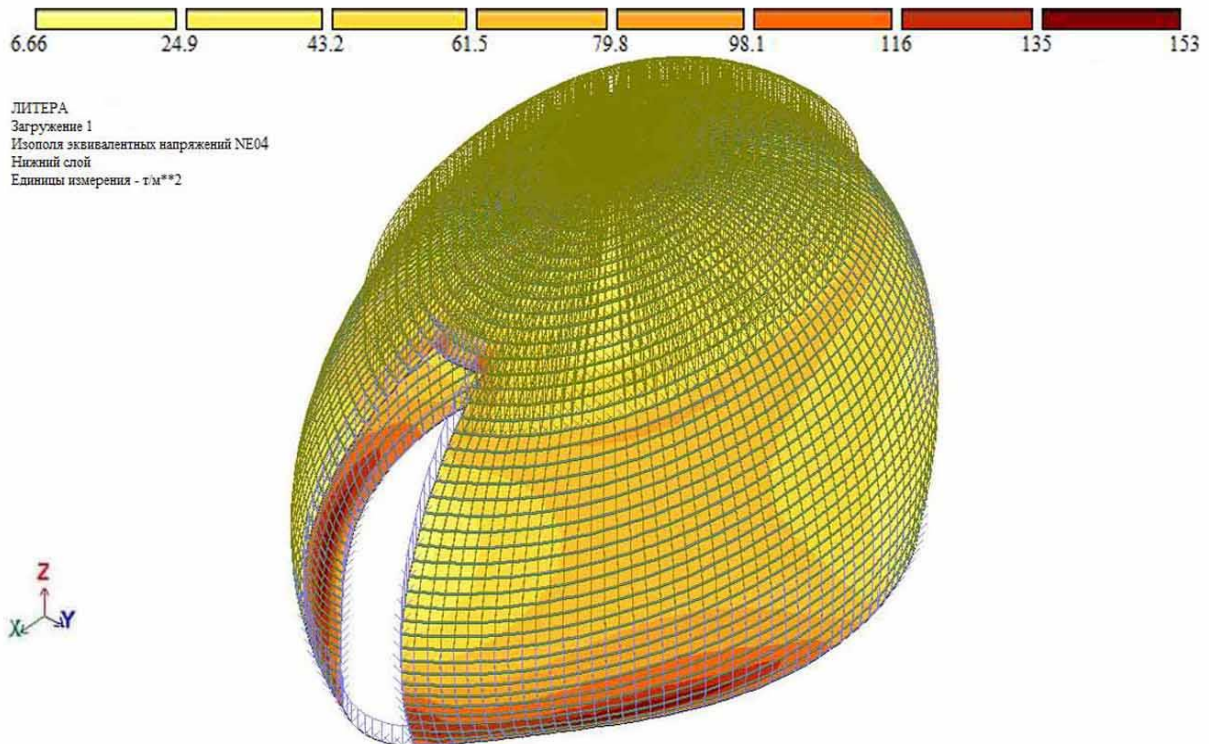


Рисунок 10 – Еквівалентні напруження N_y , т/м², у елементах оболонки діаметром екватора 3,6 м від навантажень за невігідною комбінацією №1.

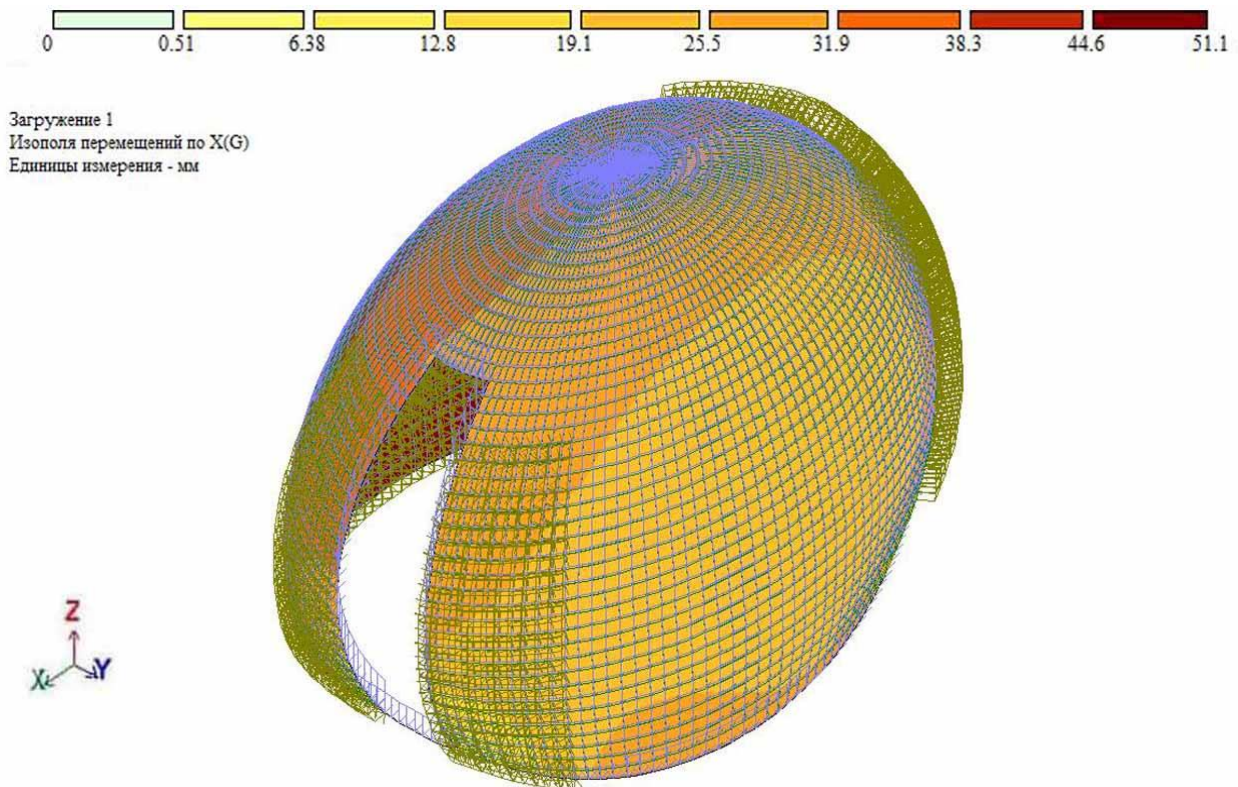


Рисунок 11 – Горизонтальні деформації вздовж осі 0x у елементах оболонки діаметром екватора 3,6 м від навантажень за невігідною комбінацією №2.

Аналогічні розрахунки були виконані і для куполів діаметром екватору 4,2 та 4,8 м.

Аналіз розроблених моделей дозволив виявити тенденцію концентрації (значного збільшення) напружень поблизу опорного кільця та дверної рами, у порівнянні із середніми напруженнями на інших ділянках, яка зберігається для куполів всіх розмірів, а, також, для всіх варіантів комбінацій тимчасових кліматичних впливів. Виявлені основні фактори, що впливають на надійність та довговічність таких споруд.

Висновки

В результаті виконання цієї науково-практичної роботи набув подальшого розвитку метод аналізу напружено-деформованого стану тонкостінних оболонок під дією комплексу розрахункових та експлуатаційних навантажень. Ґрунтовний аналіз розроблених моделей напружено-деформованого стану сферичних безкаркасних оболонок (куполів) з монолітного полікарбонату діаметром до 5 м засвідчив.

1. Для забезпечення умов міцності, стійкості форми та жорсткості куполів, які рекомендується встановлювати у 1 ... 4 сніговому, 1 ... 3 ожеледному та 1 ... 3 вітровому районах будівництва, за умови граничного терміну експлуатації 8 років, рекомендована товщина матеріалу (монолітного полікарбонату) складає $t / R = 1/600 \dots 1/800$:

- для куполів діаметром екватору до 3,2 м – 2 мм;
- для куполів діаметром екватору від 3,2 до 3,8 м – 2,5 мм;
- для куполів діаметром екватору від 3,8 до 4,5 м – 3 мм;
- для куполів діаметром екватору від 4,5 до 5 м – 3,5 мм.

Використання полікарбонату товщиною менше 2 мм не доцільне через технологічні складнощі кріплення елементів луски. За відсутності на ринку будівельних матеріалів монолітного полікарбонату товщиною 2,5 мм та 3,5 мм, виробникам безкаркасних геокуполів рекомендується купляти полікарбонат більшої товщини, відповідно, 3 та 4 мм.

2. Напруження в елементах куполу, навіть у зонах їх концентрацій поблизу опорного кільця та дверної рами, малі у порівнянні з межею міцності матеріалу. Критичними для безкаркасних полікарбонатних куполів є горизонтальні деформації від впливу вітру, явище втрати стійкості форми.

3. Розрахунками встановлено, що стійкість рівноваги та стійкість положення безкаркасних купольних полікарбонатних систем буде забезпечена тільки за умови встановлення тимчасових

анкерних пристроїв, наприклад, геошурупів, якими слід кріпити опорне кільце куполів до основ. За відсутності таких пристроїв стабілізуючої власної ваги куполів не вистачає для протидії перекидній та зсуваючій дії вітрового потоку. Тому, при неможливості встановлення анкерів (наприклад, при улаштуванні споруди на тротуарній плитці, рекомендується привантаження опорного кільця куполу баластними системами. Вага баластних систем розраховується для кожного будівельного майданчика окремо (наприклад, для куполів діаметром екватору 3,6 м, що встановлюється у 3-му вітровому районі, вага баласту повинна бути не менше 100 кг).

4. Для уточнення напружено-деформованого стану сферичних куполів, оцінки їх стійкості до кліматичних впливів, сейсмостійкості, локалізації небезпечних ділянок, що потребують особливої уваги, або підсилення шляхом потовщення полікарбонатних листів, необхідні подальші ґрунтовні дослідження, які повинні включати розробку моделей з урахуванням недосконалостей геометрії, які з'явилися при виготовленні та монтажі споруди методом скінчених елементів з урахуванням недосконалостей геометрії.

5. Загальні рекомендації з подальшої експлуатації споруди (технічний регламент):

5.1. Для експлуатації куполів, як тимчасових павільйонів рекомендується встановити такі експлуатаційні обмеження:

- гранично допустима швидкість вітру за умови анкерування при експлуатації – 15 м/с;
- гранично допустима швидкість вітру за умови анкерування при простої – 20 м/с;
- при штормовому вітрі (швидкістю більше 20 м/с) експлуатація полікарбонатних геодезичних куполів забороняється. Окрім анкерування до основи опорного кільця, потрібне додаткове розчаловання оболонки для уникнення втрати стійкості форми;
- гранична експлуатаційна вага снігового покриву – 100 Па;
- граничне значення ваги снігу при не експлуатованій споруді – 150 Па.

5.2. Встановлювати куполи на нестабільні поверхні, або поверхні, характеристики яких можуть змінюватись з часом, наприклад, трамбований сніжний покрив, крижана поверхня, мерзлий ґрунт, сипкі піски, неущільнений високо пористий насип, забороняється.

6. Особливо небезпечним до сферичних купольних систем є явище вакууму (зменшення тиску всередині приміщення куполу, у порівнянні з тиском ззовні). Тому конструкції куполу не слід герметизувати. Рекомендується комплектувати купол аераційними запобіжними клапанами. Ще краще забезпечувати надлишковий тиск всередині приміщення на рівні 0,05 Атм за рахунок припливної вентиляції.

7. Подальші напрямки досліджень пов'язані з дослідженням поведінки купольних систем діаметром екватору більше 5 м, знаходження верхньої межі раціональних розмірів екватору сферичних оболонок з полікарбонату, моделювання та оптимізація конструкцій кріплення луски, дослідження можливих форм втрати стійкості оболонок та розроблення заходів, щодо зменшення

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.6-220:2017. Покриття будівель і споруд. [Чинний від 2018-01-01]. – К.: Мінрегіон України, 2017. – 43 с. – (Національні стандарти України).
2. Гомон С.С. Г64 Конструкції із дерева та пластмас. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2016. – 219 с.
3. Беленя Е.И., Гениев А.Н., Балдин В.А. Металлические конструкции. Учеб. для вузов / Под общ. ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 463 – 469.
4. Савельев В.А. Теоретические основы проектирования металлических куполов: Дис... докт. техн. наук. – Москва, 1995. – 439 с.
5. ДБН В.2.6-168:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. На заміну ДБН В.2.6-163:2010 у частині розділу 1 та ДСТУ Б В.2.6-194:2013. [Дата надання чинності 01.01.2015 р.] – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Національний стандарт України).
6. ДСТУ EN 16153:2019. Листи світлопрозорі плоскі багатошарові з полікарбонату (PC) для внутрішнього та зовнішнього застосування для покрівель, стін і стель. Вимоги та методи випробування / Light transmitting flat multiwall polycarbonate (PC) sheets for internal and external use in roofs, walls and ceilings — Requirements and test methods. Прийнято як національний стандарт методом підтвердження за позначенням: [Чинний від 2020-01-01] – 69 с.
7. Основи теорії пластин та оболонок з елементами магнітопружності : підручник / Я. М. Григоренко, Л. В. Мольченко. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2009. – 403 с.
8. ДБН В.1.2-14-2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд: [Чинний від 2019-01-01]. – К., Мінрегіон України, 2018. – 30 с. – (Національні стандарти України).
9. ДБН В.1.2-:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [На заміну СНиП 2.01.07-85 (крім розділу 10)]. [Чинний від 2007-01-01] – К. : Мінбуд України, 2006. – 71 с. – (Державні будівельні норми України).
10. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. Введ. З 1 січня 2007 р. на заміну розділу 10 СНиП 2.01.07-85. К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с.

11. Попов В.О., Кошівський О.С. Розроблення скінчено-елементної моделі напружено-деформованого стану куполу з умов оптимального проектування. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2012-1. С. 11 – 15.

REFERENCES

1. DBN V.2.6-220:2017. Pokryttya budivel' i sporud. [Chynnyy vid 2018-01-01].– K.: Minrehion Ukrayiny, 2017. – 43 s. – (Natsional'ni standarty Ukrayiny).
2. Homon S.S. H64 Konstruktsiyyi iz dereva ta plastmas. Navchal'nyy posibnyk. – Rivne: NUVHP, 2016. – 219 s.
3. Belenya E.Y., Henyev A.N., Baldyn V.A. Metallicheskiye konstruktsyyi. Ucheb. dlya vuzov / Pod obshch. red. E.Y. Belenya.– M.: Stroyizdat, 1976. – S. 463 – 469.
4. Savel'ev V.A. Teoretycheskiye osnovy proektyrovaniya metallicheskykh kupolov: Dys... dokt. tekhn. nauk. – Moskva, 1995. – 439 s.
5. DBN V.2.6-168:2014. Stalevi konstruktsiyyi. Normy proektuvannya. Na zaminu DBN V.2.6-163:2010 u chastyni rozdil 1 ta DSTU B V.2.6-194:2013. [Data nadannya chynnosti 01.01.2015 r.] – K.: Minrehion Ukrayiny, 2014. – 199 s. – (Natsional'nyy standart Ukrayiny).
6. DSTU EN 16153:2019. Lysty svitlopronykni plaski bahatosharovi z polikarbonatu (PC) dlya vnutrishnoho ta zovnishnoho zastosuvannya dlya pokrivel', stin i stel'. Vymohy ta metody vyprobuvannya / Light transmitting flat multiwall polycarbonate (PC) sheets for internal and external use in roofs, walls and ceilings — Requirements and test methods. Prynyato yak natsional'nyy standart metodom pidverdzhennya za poznachenniam: [Chynnyy vid 2020-01-01] – 69 s.
7. Osnovy teoriiy plastyn ta obolonok z elementamy mahnitopruzhnosti : pidruchnyk / YA. M. Hryhorenko, L. V. Mol'chenko. – K.: Vydavnycho-polihrafichnyy tsentr "Kyyivs'kyi universytet", 2009. – 403 s.
8. DBN V.1.2-14-2018. Zahal'ni pryntsyipy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' i sporud: [Chynnyy vid 2019-01-01]. – K., Minrehion Ukrayiny, 2018. – 30 s. – (Natsional'ni standarty Ukrayiny).
9. DBN V.1.2-:2006. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya. [Na zaminu SNyP 2.01.07-85 (krim rozdil 10)]. [Chynnyy vid 2007-01-01] – K. : Minbud Ukrayiny, 2006. – 71 s. – (Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny).
10. DSTU B V.1.2-3:2006. Prohyny i peremishchennya. Vymohy proektuvannya. Vved. Z 1 sichnya 2007 r. na zaminu rozdil 10 SNyP 2.01.07-85. K.: Minbud Ukrayiny, 2006. – 10 s.
11. Popov V.O., Koshivs'kyi O.S. Rozroblennya skincheno-elementnoyi modeli napruzhenno-deformovanoho stanu kupolu z umov optymal'noho proektuvannya. Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyyi v budivnytstvi. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vinnytsya, VNTU, 2012-1. S. 11 – 15.

Попов Володимир Олексійович — к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, email: v.a.popov.vntu@gmail.com

Попова Аліна Володимирівна — студент. Факультет хімії, біології та біотехнологій, Донецький національний університет імені Василя Стуса, м. Вінниця, Україна e-mail: alina.popova260702@gmail.com

Ван Вей — бакалавр, Цзюцюаньський професійно-технічний коледж, м. Цзюцюань, провінція Ганьсу, КНР, email: 122743273@qq.com

V. Popov¹
A. Popova²
Wang Wei³

SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THIN-WALLED POLYCARBONATE DOMES FOR RATIONAL DESIGN

¹Vinnytsia National Technical University, Ukraine

²Vasyl' Stus Donetsk National University, Ukraine

³Jiuquan Vocational and Technical College, China

The paper contains the further developed of method for calculating thin-walled dome systems without a stationary foundation. Have been carried out the detailed analysis of the fundamental design solutions for frameless collapsible spherical polycarbonate domes, which are used by modern world manufacturers of these structures. Have been done a brief description of the momentless theory of the operation of spherical shells, which is adapted for polycarbonate domes. Have been considered a simplified analytical model of the stress-strain state of a spherical shell with an equatorial diameter of up to 5 m under the influence of climatic influences for the subsequent verification of detailed models. Have been developed highly detailed finite element models of domes of different sizes, taking into account technological openings and structural stiffeners (support ring and door frame) under the wind, snow, ice loads and under other climatic influences. Have been identified the fragments with the highest stresses from various loads and forms of the deformation of the structure.

Have been considered separately the issues related to the loss of shape stability, position and balance of a thin-walled spherical shell, as a light temporary structure. Have been proven that the worst influence on the dome structures is the wind influence, based on the stability criterion. Have been determined the estimated value of the aerodynamic lifting force from wind effects on the dome. Have been proven that the lifting force far exceeds the stabilizing force of a thin-walled dome. Have been revealed with the help of the performed calculations, it was that a frameless spherical polycarbonate dome inevitably

loses its balance stability due to the action of wind loads and requires unfastening with anchors. Have been proposed a rational method for anchoring dome structures at temporary earthen construction sites using geo-screws or metal screw piles. Have been revealed the addiction between the radius of curvature of a spherical dome and the rational thickness of polycarbonate based on the criteria of stiffness and strength. Have been formulated the constructive recommendations regarding the rational design of polycarbonate dome systems. Have been developed the technological regulations for the further safe operation of domes, and have been outlined the directions for further scientific research on this topic.

Key words: geodesic dome, monolithic polycarbonate, stress-strain state, climatic influences, meridional and ring stresses, loose of stability.

Popov Vladimir O. — Ph.D. Docent of department of civil engineering, architecture and municipal economy, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia city, Ukraine, email: v.a.popov.vntu@gmail.com

Popova Alina V. — student, Department of Chemistry, Biology and Biotechnology, Vasyl Stus Donetsk National University, Vinnytsia city, Ukraine, e-mail: alina.popova260702@gmail.com

Wang Wei — bachelor, Jiuquan Vocational Technical College, Jiuquan City, Gansu Province, People's Republic of China, e-mail: 122743273@qq.com

薄壁聚碳酸酯穹顶应力应变状态模拟及其在设计中的应用

- 1 乌克兰文尼察国立技术大学
- 2 瓦西尔·斯图斯·顿涅茨克国立大学，乌克兰
- 3 酒泉职业技术学院，中国

本文进一步改进了无固定基础薄壁圆顶体系的计算方法。对现代世界此类结构制造商使用的无骨架可折叠球形聚碳酸酯圆顶的基本设计方案进行了详细分析。简要介绍了适用于聚碳酸酯圆顶的球壳操作无力矩理论。为了进一步验证详细模型，采用了赤道直径 5m 的球壳在气候影响下的简化分析模型进行分析。针对在风、雪、冰荷载和其他不同气候影响下的技术开口和结构加劲肋（支撑环和门框）分析，分别开发出了不同高度尺寸圆顶的详细有限元模型。检测到不同荷载和建筑设计特征产生最大内部张力的区域。

作为轻型临时结构，已分别考虑了与薄壁球壳的形状稳定性、位置和平衡损失相关的问题。研究表明，根据稳定性准则，对穹顶结构的最坏影响因素是风力作用。并根据风对圆顶的影响确定气动升力的估计值。升力已被证明远远大于薄圆顶本身的稳定重量。计算表明，聚碳酸酯无骨架球形穹顶在风荷载作用下不可避免地失去平衡稳定性，需要展开锚。提出了一种在临时土工建筑场地使用土工螺杆或金属螺杆桩锚固穹顶结构的合理方法。根据刚度和强度标准，揭示了球形穹顶曲率半径与聚碳酸酯合理厚度之间的相关性。提出了关于聚碳酸酯圆顶系统合理设计的建设性建议。进一步制定了穹顶安全操作的技术规范，并概述了该课题进一步科学研究的方向。

关键词：大地穹顶、单分子聚碳酸酯、应力应变状态、气候影响、经向应力和环向应力、失稳。

Popov Vladimir O. —乌克兰文尼西亚市文尼察国立技术大学土木与环境工程学院土木工、建筑与市政经济系博士，电子邮箱：v.a.popov.vntu@gmail.com

Popova Alina V. —乌克兰文尼西亚市瓦西尔·斯图斯·顿涅茨克国立大学化学、生物和生物技术系学生，电子邮箱：alina.popova260702@gmail.com

王玮——中华人民共和国甘肃省酒泉市酒泉职业技术学院学士，电子邮箱：122743273@qq.com