

В. О. Попов¹
А. В. Попова²
О. С. Баранецька¹

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВОГО СТРИЖНЕВОГО КАРКАСУ ГЕОДЕЗИЧНОГО КУПОЛУ ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

¹Вінницький національний технічний університет, Україна
²Донецький національний університет імені Василя Стуса, Україна

У статті набув подальшого розвитку метод розрахунку тонкостінних оболонок із несучим каркасом у вигляді геодезичних куполів без стаціонарного фундаменту. Виконано ґрунтовний аналіз принципового конструктивного рішення каркасних збірно-розбірних куполів з тентовим двошаровим покриттям, внутрішній шар яких служить як проєкційний екран тривимірних кінотеатрів, які набувають популярності в індустрії розваг. Розроблено високо деталізовану скінчено-елементну модель напружено деформованого стану куполу діаметром основи 13,5 м з урахуванням технологічних прорізів та конструктивних елементів жорсткості під дією вітрових, снігових, ожеледних та інших кліматичних впливів. При цьому змодельовано різні варіанти приєднання каркасу куполу до основи. Доведено, що найгіршим впливом для конструкцій куполу, виходячи з критерію стійкості, є вітровий вплив. Доведено, також, що каркасна стрижнева тентована споруда геокуполу не може безпечно функціонувати у випадку відсутності надійного приєднання до основ. Для усіх варіантів приєднання до основи виявлено ділянки стрижневих елементів каркасу з найбільшими внутрішніми напруженнями від різних навантажень, розглянуто загальний характер деформування і можливого руйнування споруди, а, також, питання втрати стійкості. Виявлено, що до найбільш напружених конструкцій відноситься тентове покриття та болтові кріплення стиків стрижневої системи. Запропоновано раціональний спосіб анкерування конструкцій каркасу куполу на тимчасових земляних майданчиках з використанням геошурупів або металевих гвинтових паль. Доведена можливість анкерування опорних елементів куполу у п'яти полярно симетричних точках з використанням баласту. Сформульовано конструктивні рекомендації щодо раціонального проектування каркасних купольних систем. Розроблений технологічний регламент з подальшої безпечної експлуатації геодезичних каркасних куполів, а також, окреслено напрямки подальших наукових досліджень за цією тематикою.

Ключові слова: геодезичний каркасний купол, сферичний проєкційний екран, тентове покриття, напружено-деформований стан, кліматичні впливи, тентове покриття, втрата стійкості.

Вступ

Геодезичні куполи у вигляді каркасних стрижневих систем були запатентовані у середині ХХ сторіччя [1 – 3]. Вони широко використовуються за кордоном, як тимчасові торговельно-розважальні павільйони, теплиці, елементи декору на плоских покрівлях будівель, конструкції покриття башт та еркерів. Як малі архітектурні форми, геодезичні куполи можуть використовуватися з покриттям та без нього. Сферична, та, іноді, еліптична, форма геодезичних куполів володіє надзвичайно високою архітектурною виразністю [3, 4]. В Україні геодезичні куполи почали з'являтися протягом останнього десятиріччя. Основними вітчизняними виробниками на сьогодні є фірми Escorod, Cupol-Space (м. Івано-Франківськ), ПП «Кедр» (м. Київ), ТОВ «PromoZR» (м. Запоріжжя), ТОВ «Авіліон» (м. Харків) [1 – 6].

Тонкостінні сферичні куполи є частинним випадком будівельних оболонок. У закордонній інженерній практиці геодезичні куполи з металевим каркасом покривають світлопрозорим, або не прозорим покриттям: тентом, закаленим склом, монолітним полікарбонатом. З теорії розрахунку будівельних оболонок відомо, що внутрішні зусилля у елементах каркасних куполів, що виникають від тимчасових кліматичних навантажень, малі, у порівнянні з несучою здатністю конструкцій куполу. Тому і постає можливість побудови цих просторових систем з мінімальними витратами матеріалів [1 – 3].

У подальшому розглядаються каркасні геодезичні куполи з тентовим покриттям.

Через свою ефективну конструкцію, яка може бути безфундаментною, легкість перевезення складання та монтажу, ефектність зовнішнього вигляду, такі споруди можуть використовуватися у індустрії розваг, одним із напрямів якої є проєкційні тривимірні кінотеатри нового покоління. В таких кінотеатрах за допомогою спеціального обладнання зображення проєктується на екран сферичної форми. При цьому для глядачів створюється ефект присутності у середині подій. Однак для таких споруд виникає технічна складність створення ідеальної півсферичної форми екрану, адже, чим менше на екрані буде недосконалостей, тим більш реалістичне зображення побачать глядачі. Вітчизняними спеціалістами з фірми LuxDome та ASE Myplanetarium, виходячи з аналізу закордонного досвіду, було запропоновано використовувати геодезичні куполи з двошаровими натяжними системами, проміжок між якими являє собою замкнену герметичну камеру. Сам геодезичний купол виконує функцію несучого каркасу проєкційного півсферичного екрану, які розташовується в середині куполу (рис. 1).



Рисунок 1 – Загальний вигляд каркасу тривимірного проєкційного кінотеатру у вигляді геодезичного куполу фірми ASE Myplanetarium під час виготовлення. Тентове покриття змонтоване частково.

Для сприйняття зовнішніх кліматичних впливів служить зовнішнє тентове покриття. Ідеальна сферична форма внутрішньої гнучкої оболонки (екрану) досягається за принципом роботи повітряної кулі. Ззовні екрану у герметичній камері системою компресорів створюється негативний тиск (вакуум), який сприяє натягуванню внутрішнього екрану атмосферним тиском. Екран набуває майже ідеальної півсферичної форми в момент, коли компресори працюють. Покриття (зовнішня оболонка куполу) тримається каркасом, який, в момент відсмоктування повітря, щільно охоплює. При вимкнених компресорах внутрішня гнучка оболонка камери (екран) обвисає на підвісах, приєднаних до геодезичного куполу, та зморщується. Отже, мала архітектурна форма може виконувати свою функцію проєкційного тривимірного кінотеатру тільки за умови працюючих компресорів.

Постановка проблеми

На ринку України каркасні купольні системи закордонного виробництва існують, достатньо давно, мало того, вже близько десятиліття пропонуються вітчизняними фірмами-виробниками. Однак, не зважаючи на зростаючу популярність, ґрунтовної наукової бази за напрямком раціонального проєктування геодезичних куполів ще не було напрацьовано. Не розв'язаними залишаються конструктивні питання надійного тимчасового приєднання купольних систем до поверхні землі, науковцями не досліджено розподіл внутрішніх зусиль у елементах каркасно-стрижневих систем в залежності від обрану способу анкерування до поверхні, робота тентового покриття під навантаженням, а, також, способи підвищення довговічності геодезичних стрижневих куполів. Не до кінця вирішені технологічні питання щодо ефективного способу виготовлення елементів каркасу, технології їх з'єднання, питання забезпечення монтажної точності геодезичних куполів та багато інших [1 – 6]. Тому дослідження, присвячені раціональному проєктуванню геодезичних купольних систем для проєкційних тривимірних кінотеатрів є доцільними та актуальними.

Виходячи з попередніх міркувань постає наукова задача – дослідити напружено-деформований стан геодезичних куполів під дією комплексу кліматичних навантажень з урахуванням спільної роботи з основою та різних способів приєднання металокаркасу куполів до основи.

Основна частина

Як приклад розглянемо каркасно-стрижневий геодезичний купол, який служить опорним скелетом пересувного проєкційного кінотеатру діаметром основи 13,5 м. Згідно з технологічних особливостей споруда являє собою сферо-циліндричний купол, виготовлений за каркасно-стрижневою технологією з чарунок у вигляді трикутників, сформованих трубчастими елементами, що з'єднані між собою болтовими кріпленнями. В основі куполу, а також, в рівні стику циліндричної та сферичної частин улаштовані, відповідно, опорне та формоутворююче кільця, останнє – у вигляді окремих елементів, з'єднаних у вузлах жорстко. Система триангуляції сферичної поверхні стрижневими елементами – п'ятикутна зірка, система полігонів каркасу трикутна. Модель металокаркасу споруди показана на (рис. 2).

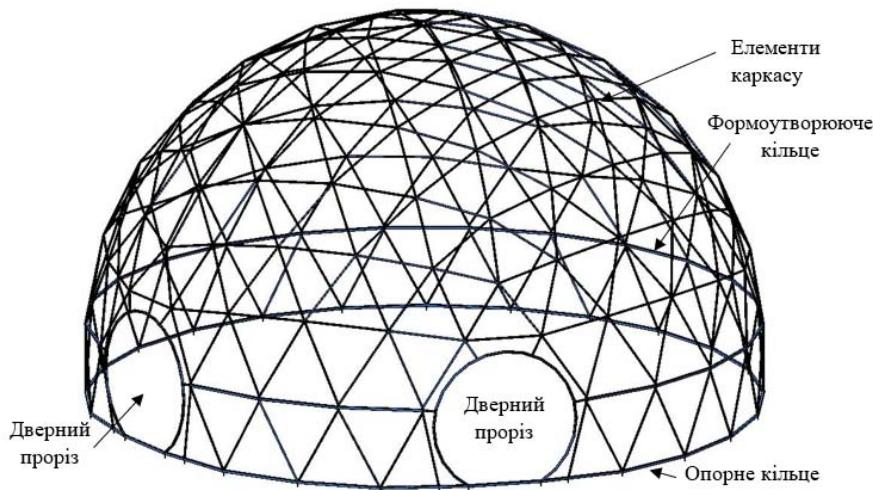


Рисунок 2 – Модель геодезичного куполу діаметром основи 13,5 м. Тентове покриття та внутрішній проекційний екран умовно не показані.

Виходячи з інженерного досвіду закордонних проектувальників основні стрижневі елементи куполу та опорного кільця пропонується виготовляти з електрозварних тонкостінних труб, які мають великий радіус інерції i , відповідно, найкраще працюють на стиск. Каркас вхідних груп геодезичного куполу доцільно вирішувати у вигляді замкнених кілець, або багатогранників з круглих труб. Виходячи з вимог безпечної експлуатації у конструкції куполу слід передбачити два дверних прорізи діаметром 2,9 м. Стрижневі елементи формоутворюючого кільця куполу доцільно виготовляти з гнутих квадратних профілів [1]. Перерізи конструктивних елементів необхідно визначати за результатами моделювання напружено-деформованого стану.

Згідно з даними виробника геодезичний купол виготовляють без стаціонарного фундаменту і споруда є тимчасовою, збірно-розбірною та пересувною. Відповідно, на цю споруду розповсюджуються вимоги норм [10], як для тимчасових малих архітектурних форм (клас наслідків СС-1).

У [1] було доведено, що найбільш не вигідним є встановлення споруди на природній ґрунт. Для пошуку раціонального способу приєднання металевої конструкції геодезичного куполу до основ розглянуто такі можливі варіанти. Варіант 1 – опорне кільце не приєднане до основи; варіант 2 – опорне кільце геодезичного куполу розкріплене від зміщення (ковзання) в п'яти полярно симетричних опорних точках (рис. 3); варіант 3 – опорне кільце приєднане до основи у всіх опорних точках.

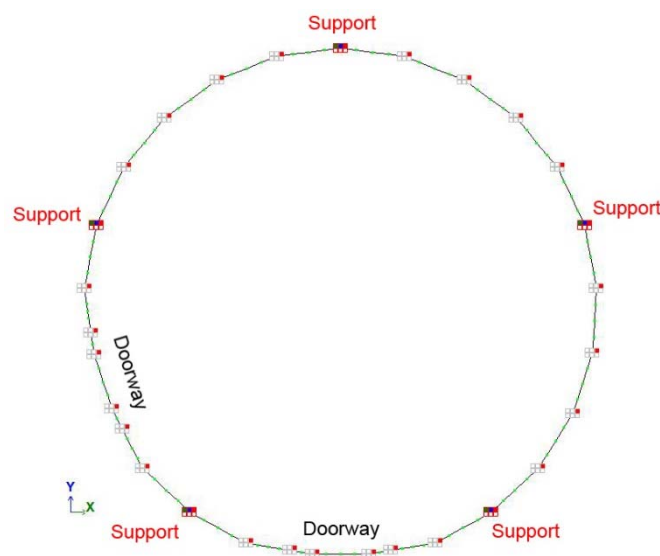


Рисунок 3 – Схема опорного кільця споруди з привантаження п'яти ключових точок баластом (варіант моделі 2), у місцях, позначених "Support".

Саме приєднання реалізується або баластними системами, або металевими гвинтовими палями (чи геошурупами), які закручують у ґрунт.

При моделюванні враховані такі граничні експлуатаційні обмеження:

Допустимі кліматичні райони: за впливом вітру – 1 ... 3 (нормативна швидкість вітрового напору $V_{f \max} = 27$ м/с, вітровий тиск 500 Па на відмітці до 5 м); за сніговим навантаженням – 1 ... 4 (нормативний тиск 1,4 кПа); за ожеледним впливом – 1 ... 3. Для легких купольних систем сейсмічний вплив не є небезпечним, тому подібні купольні системи можуть встановлюватись і у сейсмонебезпечних зонах. Граничний вітровий вплив на тентове покриття споруди – $V_{fe} = 20$ м/с. При прогнозованій швидкості вітру, що перевищує 20 м/с, умовами експлуатації передбачений демонтаж тентового покриття.

Розрахунок тривимірної комп'ютерної моделі геодезичного куполу виконаний шляхом моделювання основних елементів у вигляді тривимірної моделі за допомогою програмного комплексу «Lira-Windows», що є комп'ютерною системою для структурного аналізу та проектування. Теоретичною основою використаної програми є метод скінчених елементів (МСЕ). Реалізований варіант МСЕ використовує принцип можливих переміщень.

Розрахункова схема споруди прийнята у вигляді просторової системи, що складається із пластинчатих елементів, які моделюють роботу тентового покриття та стрижневих елементів, які моделюють роботу опорного металокаркасу. Інші елементи, що не підвищують міцність і жорсткість геодезичного куполу, змодельовані у вигляді корисного постійного навантаження.

Товщина пластинчастих скінчених елементів тентового покриття куполу прийнята у відповідності до проектних рішень – 0,5 мм. Нормативна вага покриття – $0,85$ кг/м².

Власна вага стрижневих елементів геодезичного куполу та тенту прикладена програмою автоматично з урахуванням коефіцієнта запасу.

Міцнісні та жорсткісні характеристики пластинчастих та стрижневих елементів покриття моделі. Короткочасний модуль пружності матеріалу тенту $E_k = 1890$ МПа. Коефіцієнт Пуассона для всіх пластинчастих елементів покриття $\nu = 0,4$. Крок дискретизації пластинчастої моделі ~ 200 ... 400 мм. Товщина пластинчастих елементів – 0,5 мм. З'єднання стрижневих елементів моделі у вузлах – шарнірне, окрім елементів формоутворюючого кільця, з'єднання між елементами якого – жорстке. Розрахунковий модуль пружності стрижневих елементів $E_{cm} = 206$ ГПа, густина сталі $\rho_{cm} = 7,85$ т/м³, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$.

Перевірка несучої здатності і стійкості конструкцій виконана відповідно до діючих нормативних документів [7 ... 11].

Методологія збору кліматичних навантажень на споруду детально описана у [3, 4]

А) Навантаження від вітру зібране у відповідності до [10]. Прийнятий граничний вітровий район встановлення – 3. Граничне розрахункове вітрове навантаження згідно з [10, с.24]:

$$W_m = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C \text{ [кН/м}^2\text{]}, \quad (1)$$

де $W_0 = (0,4 \dots 0,5)$ 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. C – коефіцієнт, що визначається за формулою (2):

$$C = C_{aer} \cdot C_h \cdot C_{alt} \cdot C_{rel} \cdot C_{dir} \cdot C_d \quad (2)$$

У формулі (2) C_h – коефіцієнт висоти споруди [10, табл. 9.02]. Оскільки споруди, що досліджуються, висотою 7,75 м, $C_h = 1,4 \dots 1,58$; коефіцієнт географічної висоти $C_{alt} = 1$ оскільки $H < 0,5$ км, $C_{dir} = 1$ – коефіцієнт напрямку; $C_{rel} = 1$ – коефіцієнт рельєфу для рівнинної місцевості; $C_d = 1$ – коефіцієнт динамічності. Для знаходження аеродинамічного коефіцієнта сферичного купола слід визначити число Рейнольдса: $Re = 0,88 \cdot d \cdot \sqrt{W_0 \cdot C_h \cdot \gamma_{fm}} = 251 \cdot 10^5 > 4 \cdot 10^5$. Аеродинамічний коефіцієнт для циліндричної частини $C_{aer} = C_e = (+1 \dots -1)$. Для сферичної частини купола з кутом при основі сегмента сфери $\beta = 5^\circ$: $C_{aer} = C_e = (+0,94 \dots -1,25)$.

Схема розподілу вітрових тисків по висоті споруди показана на рис. 4.

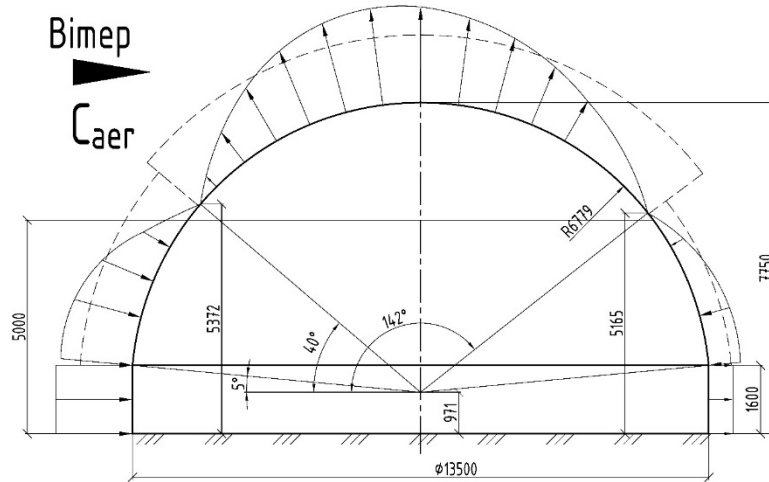


Рисунок 4 – Схема, що ілюструє спрощений розподіл аеродинамічних коефіцієнтів по висоті споруди (пунктиром показано спрощену модель).

Б) Снігові навантаження. Нормативна вага снігового покриття на 1 м^2 згідно з [10, розділ 8] для 1 ... 4-го району $S_0 = 0,8 \dots 1,4 \text{ кПа}$.

Граничне розрахункове значення снігових впливів на покрівлю куполу розраховуємо згідно з (3):

$$S_m = \gamma_{fm} \cdot S_0 \cdot C \text{ [кПа]}, \quad (3)$$

У формулі (3) $C = C_e \cdot C_{alt} \cdot \mu$. Згідно з [10, додаток Ж, с.55 – 56] застосована схема снігового впливу – за варіантом 1 (рис. 5). 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 $C = \cos(1,8 \cdot \alpha)$.

Інші кліматичні впливи зібрані згідно [9].

За результатами деталізованого скінчено елементного моделювання отримано значення внутрішніх зусиль у стрижневих елементах каркасу, напруження у елементах тентового покриття, а, також, можливі форми втрати стійкості від різних комбінацій тимчасових кліматичних і технологічних впливів (рис. 6 – 8).

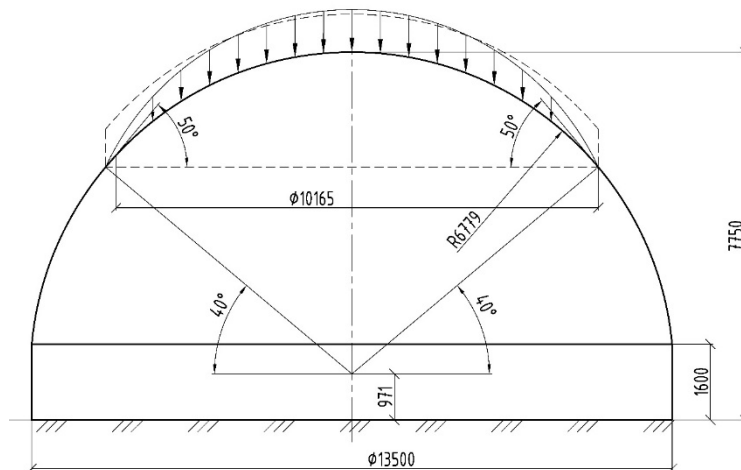


Рисунок 5 – Схема прикладання снігового впливу до покриття геодезичного куполу. Пунктиром показаний спрощений варіант.

Розрахунками встановлено, що для всіх варіантів приєднання споруди до основи найбільш не вигідним є тимчасовий вітровий вплив. Аналіз розроблених моделей дозволив виявити тенденцію концентрації (значного збільшення) напружень у елементах поблизу дверних прорізів.

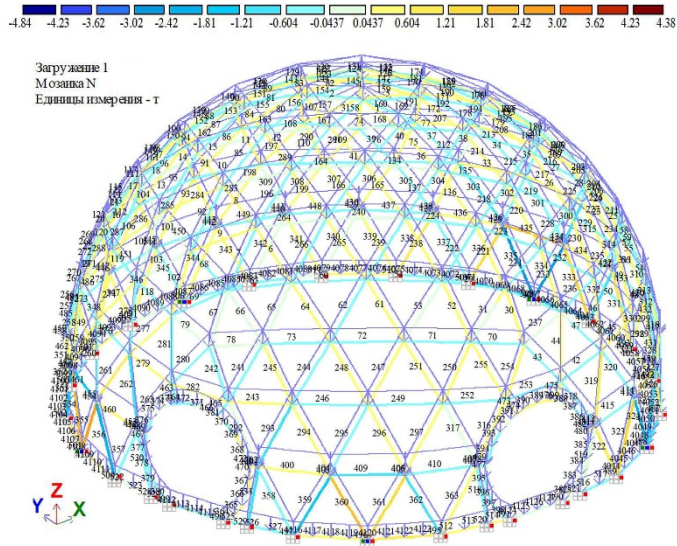


Рисунок 6 – Осьові зусилля N, т, у, в елементах геодезичного куполу, приєднаного до основи у п'яти точках, від невідданого комплексу тимчасових впливів, включаючи вітровий.

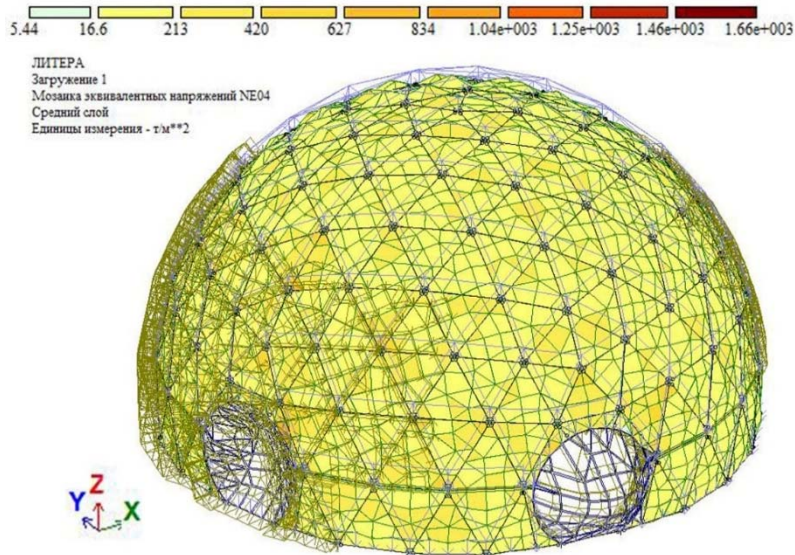


Рисунок 7 – Еквивалентні напруження у тентовому покритті геодезичного куполу, приєднаного до основи у п'яти точках, від експлуатаційного вітрового впливу швидкістю 20 м/с.

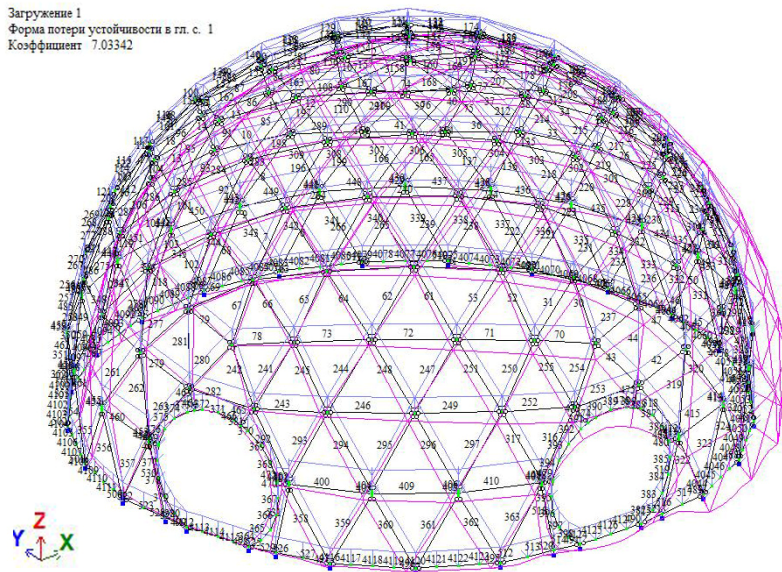


Рисунок 8 – Втрата стійкості конструкцій каркасного КуполуD13.5 за 1-ою формою для варіанта 3 моделі. Спостерігається можливе викривлення поверхні по всій висоті споруди в бік вітру.

Експлуатувати вільно розташований геодезичний тентований купол без анкерування до ґрунту, або, без привантаження баластом (варіант 1), не можна. Навіть при відносно малих значеннях вітрового впливу (менше 15 м/с) не забезпечуються умови стійкості положення, збереження форми і рівноваги куполу. Це корелює з авторськими дослідженнями, присвяченими іншим спорудам з індустрії розваг [12].

Найслабшими елементами геодезичного куполу є тентове покриття, а також, болтові кріплення між конструктивними стрижневими елементами каркасу.

Прогнозований характер роботи споруди для раціонального за критерієм вартості варіанта приєднання моделі у п'яти ключових точках, як показано на рис. 3 (варіант 2), за можливими граничними станами:

Етап 1 – нормальна робота (швидкісний напір вітру $V_f < V_{fe} = 20$ м/с. Етап 2 – руйнування (локальні розриви) тентового покриття $V_f = 20...24$ м/с. Етап 3 (за умови, що тентове покриття вціліло) – надмірні деформації, що перевищують гранично встановлені нормативами, викривлення металокаркасу при $V_f = V_{f_{max}} = 27$ м/с. Етап 4 (якщо втраті стійкості завадили страхувальні розчалки) – руйнування кріпильних болтів. Якщо болти вціліли – руйнування опорного, формоутворюючого кілець та опорних підкосів $V_f > V_{f_{max}} = 27$ м/с, втрата стійкості форми споруди.

Збільшення металомісткості каркасу, загалом, позитивно позначається на параметрах несучої здатності та експлуатаційної надійності. Орієнтовна вага збірно-розбірного металевих каркасу для куполів діаметром 13,5 м (площа основи 143 м²) складає близько 2 т, а це близько 14 кг/м², що, враховуючи велику висоту споруди, є економічно прийнятним і доцільним.

Зазначені загальні тенденції, викладені вище, були підтверджені аналогічними розрахунками геодезичних куполів діаметром основи 10 ... 15 м.

Висновки

В результаті виконання цієї науково-практичної роботи набув подальшого розвитку метод аналізу напружено-деформованого стану геодезичних стрижневих куполів, вкритих тонкостінним тентовим покриттям, під дією комплексу розрахункових та експлуатаційних навантажень. Ґрунтовний аналіз розроблених моделей напружено-деформованого стану геодезичних куполів засвідчив.

1. Найбільш небезпечним для легких купольних систем є ураганний вітер.
2. Надійність купольних систем в першу чергу залежить від ступеня надійності анкерних елементів і від їх кількості. Безпечно експлуатувати геодезичні куполи без анкерування у ґрунтах не можливо.
3. Отримані сервісні коефіцієнти (коефіцієнти запасу) для найбільш надійного приєднання купольних систем (анкеруванням усіх опорних точок у ґрунті гвинтовими палями) у півтора рази перевищують сервісні коефіцієнти для найбільш економічного способу – привантаження п'яти ключових точок баластом.
4. Найбільш уразливими елементами геодезичного куполу при впливі невіддільних комбінацій навантажень є тентове покриття, а також, болтові кріплення між конструктивними стрижневими елементами каркасу.
5. Встановлювати куполи на нестабільні поверхні, або поверхні, характеристики яких можуть змінюватись з часом, наприклад, трамбований сніжний покрив, крижана поверхня, мерзлий ґрунт, сипкі піски, неушільнений високо пористий насип, забороняється.
6. Подальші рекомендовані напрямки досліджень пов'язані з вивченням поведінки купольних систем діаметром основи більше 15 м під дією комплексу кліматичних навантажень, дослідження можливих форм втрати стійкості оболонки, розроблення конструктивних і технологічних заходів, щодо зменшення ймовірності втрати стійкості та оптимізація вузлових кріплень елементів металокаркасу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Попов В. О. Раціональні геодезичні стрижневі купольні системи для пересувних планетаріїв [Електронний ресурс] / В. О. Попов, О. С. Баранецька // Матеріали LIІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 14-23 березня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/18983>
2. Popov V. Connector of polycarbonate dome frameless structure / V. Popov, Wei Wang // China building decoration. №12, 03.2023. P. 330 - 331. Link: <http://www.qikan.com.cn/newarticleinfo/dzqy20224762.html>
3. Попов В.О., Попова А.В., Ван Вей. Моделювання напружено-деформованого стану тонкостінних куполів з полікарбонату для раціонального проектування. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2022-2. С. 81 – 93.

4. 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.
5. Popov V. Rational constructive form of frameless thin-walled domes made of monolithic polycarbonate [Electronic resource] / V. Popov, Wei Wang // Abstracts of the report at the scientific and technical conference of the Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering (2023) (VNTU) – Electronic text data – 2023. Link: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/17455/14735>
6. Попов В.О. Безкаркасні тонкостінні куполи з монолітного полікарбонату – система покриття майбутнього [Електронний ресурс] / В.О. Попов В.О. Вей Ван // Тези доповіді на Міжнародній науково-технічній конференції: «Інноваційні технології в будівництві-2022» (м. Вінниця, 23-25.11.2022) – Електрон. текст. дані. – 2022. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2022/paper/view/16738>
7. ДБН В.2.6-220:2017. Покриття будівель і споруд. [Чинний від 2018-01-01].– К.: Мінрегіон України, 2017. – 43 с. – (Національні стандарти України).
8. 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).
9. 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).
10. ДБН В.1.2-3:2006. 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).
11. 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.
12. Попов В.О., Кондратенко І.П., Ращепкін А.П. Безфундаментні башти-атракціони з високоточним стовбуром. Монографія – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 250 с.

REFERENCES

1. Popov V. O. Ratsional'ni heodezychni stryzhnevi kupol'ni systemy dlya peresuvnykh planetariyiv [Elektronnyy resurs] / V. O. Popov, O. S. Baranets'ka // Materialy LII naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi pidrozdiliv VNTU, Vinnytsya, 14-23 bereznya 2023 r. – Elektron. tekst. dani. – 2023. – Rezhym dostupu: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/18983>
2. Popov V. Connector of polycarbonate dome frameless structure / V. Popov, Wei Wang // China building decoration. №12, 03.2023. P. 330 - 331. Link: <http://www.qikan.com.cn/newarticleinfo/dzqy20224762.html>
3. Popov V.O., Popova A.V., Wang Wei. Modelyuvannya napruzhenno-deformovanoho stanu tonkostinnykh kupoliv z polikarbonatu dlya ratsional'noho proektuvannya. Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vinnytsya, VNTU, 2022-2. S. 81 – 93.
4. Popov V.O., Koshiv's'kyi O.S. Rozroblennya skincheno-elementnoyi modeli napruzhenno-deformovanoho stanu kupolu z umov optymal'noho proektuvannya. Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vinnytsya, VNTU, 2012-1. S. 11 – 15.
5. Popov V. Rational constructive form of frameless thin-walled domes made of monolithic polycarbonate [Electronic resource] / V. Popov, Wei Wang // Abstracts of the report at the scientific and technical conference of the Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering (2023) (VNTU) – Electronic text data – 2023. Link: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/17455/14735>
6. Popov V.O. Bezkarakasni tonkostiinni kupoly z monolitnoho polikarbonatu – sistema pokryttya maybutn'oho [Elektronnyy resurs] / V.O. Popov V.O. Wei Wang // Tezy dopovidi na Mizhnarodniy naukovo-tekhnichniy konferentsiyi: «Innovatsiyini tekhnolohiyi v budivnytstvi-2022» (m. Vinnytsya, 23-25.11.2022) – Elektron. tekst. dani. – 2022. Rezhym dostupu: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2022/paper/view/16738>
7. 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).
8. DBN V.2.6-168:2014. Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya. Na zaminu DBN V.2.6-163:2010 u chastyni rozdiliv 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).
9. 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).
10. DBN V.1.2-3:2006. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya. [Na zaminu SNyP 2.01.07-85 (krim rozdiliv 10)]. [Chynnyy vid 2007-01-01] – K. : Minbud Ukrayiny, 2006. – 71 s. – (Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny).
11. DSTU B V.1.2-3:2006. Prohyny i peremishchennya. Vymohy proektuvannya. Vved. Z 1 sichnya 2007 r. na zaminu rozdiliv 10 SNyP 2.01.07-85. K.: Minbud Ukrayiny, 2006. – 10 s.
12. Popov V.O., Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P. Bezfundamentni bashty-atraktsiony z vysokotochnym stovburom. Monohrafiya – Vinnytsya: UNIVERSUM-Vinnytsya, 2009. – 250 s.

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 ORCID 0000-0003-2379-7764

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

Баранецька Олена Сергіївна – бакалавр будівництва, фахівець центру забезпечення якості освіти Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця. email: alexeyielenka@gmail.com

V. Popov¹
A. Popova²
O. Baranetska¹

SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF METAL ROD FRAME OF THE GEODESIC DOMES FOR RATIONAL DESIGN

¹Vinnitsia National Technical University, Ukraine

²Vasyl' Stus Donetsk National University, Ukraine

The paper contains the further developed of method for calculating thin-walled shells with supporting frame in the form of geodesic domes without a stationary foundation. Have been performed the detailed analysis of the fundamental design solutions of frame demountable domes with tent double-layer cover, the inner layer of which serves as a projection screen of three-dimensional cinemas, which are gaining popularity in the amusement industry. Have been developed highly detailed finite element models of dome with a base diameter of 13.5 m, taking into account technological holes and structural elements of rigidity under the influence of wind, snow, ice and other climatic influences. Have been modeled at the same time, various options for connecting the dome frame to the base. Have been proven that the worst influence on the dome structures is the wind influence, based on the stability criterion. Have been proven at also that the frame-rod tented construction of the geodome cannot function safely without reliable connection to the base. Have been identified, areas of the core elements of the frame with the highest internal stresses from various loads for all possible options for connecting the frame to the base. Have been considered the general nature of deformation and possible destruction of the structure, as well as the issue of loss of stability. Have been founded that the most stressed structures include the tent cover and bolted fasteners of the joints of the rod system. Have been proposed a rational method for anchoring frame dome structures at temporary earthen construction sites using geo-screws or metal screw piles. Have been proven the possibility of anchoring the supporting elements of the dome in five polar symmetrical points using ballast. Have been formulated the constructive recommendations regarding the rational design of frame dome systems. Have been developed the technological regulations for the further safe operation of frame geo-domes, and have been outlined the directions for further scientific research on this topic.

Key words: *geodesic frame dome, spherical projection screen, tent cover, stress-strain state, climatic influences, loose of stability.*

Popov Vladimir O. — Ph.D. Docent of department of civil engineering, architecture and municipal economy, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnitsia national technical university, Vinnitsia city, Ukraine, email: v.a.popov.vntu@gmail.com ORCID 0000-0003-2379-7764

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

Baranetska Olena S. – bachelor of civil engineering, specialist of the center for ensuring the quality of education of the Vinnitsia National Technical University, Vinnitsa city, email: alexeyielenka@gmail.com