

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра Будівництва, міського господарства та архітектури

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Геодезичні стрижневі куполи»

Виконала: студентка 2-го курсу, групи 2Б-22м \_\_\_\_\_

Спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія

(номер і назва спеціальності)

(прізвище та ініціали студента)

Баранецька С

Керівник: к.т.н., доцент

(прізвище та ініціали)

Попов

Опонент \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Геманов

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри БМГА

к.т.н., доц. Швець В. В.

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_\_ » 2023 р.

Вінниця ВНТУ – 2023 рік

Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Будівництва, цивільної та екологічної інженерії

Кафедра Будівництва, міського господарства та архітектури

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки 19 Архітектура та будівництво  
(шифр і назва)

Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія  
(шифр і назва)

Освітня програма Промислове та цивільне будівництво

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри БМГА

Швець В.В.

«   » 2023 року

## ЗАВДАННЯ

### НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТА

Баранецька Олена Сергіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту(роботи) Геодезичні стрижневі куполи

керівник роботи Попов Володимир Олексійович, к.т.н., доц. Каф. БМГА

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «   » 20 року №    

2. Строк подання магістрантом роботи 05.12.2023

3. Вихідні дані до роботи: Робота – наукового спрямування. Форма – сфероциліндрична, комбінована. Призначення – для малих архітектурних форм без стаціонарних фундаментів, в тому числі, для тимчасових оглядових павільйонів. Габаритні розміри резервуарів: діаметр основи – до 15 м, висота до 10 м, матеріал конструкцій каркасу – сталеві горячекатані та електрозварні труби, матеріал покриття – тент, матеріал внутрішнього екрану – тент. Навантаження – кліматичні (сніг, вітер, ожеледь), корисні технологічні впливи збоку систем кондиціонування.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, у якому слід відобразити актуальність теми, мету, новизну практичне значення, задачі, об'єкт та предмет досліджень. Науково-дослідна частина що складається з трьох розділів: Розділ 1, у якому слід виконати аналіз стану питань з розрахунків і проектування куполів, загалом, та стрижневих геодезичних систем зокрема, методи оптимізації, аналіз нормативних і літературних джерел по темі МКІ та окреслити напрямок подальших досліджень базуючись на не достатньо досліджених питаннях; Розділ 2, у якому слід виконати аналітичне та скінченне елементне моделювання напружено-деформованого стану геодезичних куполів урахуванням особливостей приєднання до ґрунтових основ та спільної роботи тентовим покриттям; Розділ 3 – Аналіз у узагальненні результатів моделювання

конструктивні і технологічні пропозиції, аналіз небезпечних факторів для геодезичних купольних систем, Розділ 4 — Економічний, у якому дослідити економічний ефект запропонованих рішень з тимчасового анкерування купольних систем до основ порівнянні з класичними, Висновки, в яких відобразити основні наукові та практичні результати виконаної роботи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) значення, 4, 5 — приклади купольних систем, включаючи геодезичні куполи, стан питання з проектування стрижневих сферичних оболонок; 6 — 8 скінчено-елементні моделювання; 9, 10 — висновки за результатами обчислень, пропозиції, обмеження; 11, 12 результати економічних розрахунків; 13 — загальні висновки з МКР

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Вступ, Розділ 1	Попов В.О., доц. каф. БМГА		
Розділ 2	Попов В.О., доц. каф. БМГА		
Розділ 3	Попов В.О., доц. каф. БМГА		
Розділ 4. Економіка	Лялюк О.Г., доц. каф. БМГА		
Охорона праці	Не розробляється		

7. Дата видачі завдання 04.09.2023

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Виконати науковий аналіз стану питання з проектування геодезичних стрижневих куполів, пошук відповідних наукових та нормативних джерел. Розглянути історію куполо будування. Оформити у вигляді Розділу 1	04.09 – 12.09.2023	
2	Розробка Вступу до роботи	12.09 – 19.09.2023	
3	Розробка Розділу 2 науково-дослідної частини розділу з моделювання напружено-деформованого стану геодезичних куполів	19.09 – 30.09.2023	
4	Розробка розділу 3 (конструктивні та технологічні пропозиції)	1.10 – 30.10.2023	
5	Розробка розділу 4 — Економіка	1.11 – 30.11.2023	
6	Підготовка до опублікування та публікація результатів МКР. Апробація	До 01.12.2023	
7	Перевірка роботи на плагіат	04.12.2023	
8	Попередній захист магістерської роботи	05.12.2023	

Магістрант Баранецька О.С.  
 (підпис) (прізвище та ініціали)  
 Керівник роботи Попов В.О.  
 (підпис) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

УДК 624.15

Баранецька О.С. Геодезичні стрижневі куполи. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 192 – «Будівництво та цивільна інженерія», освітня програма – «Промислове та цивільне будівництво». Вінниця : ВНТУ, 2023. 104 с.

Укр. мовою. Бібліогр.: 40 назв; 31 рис.; 17 табл. 19 аркушів графічної частини.

В магістерській кваліфікаційній роботі досліджено напружено-деформований стан геодезичних стрижневих куполів з тентовим покриттям без стаціонарного фундаменту для пересувних малих архітектурних форм, павільйонів та планетаріїв. Виявлено, що міцність, стійкість та працездатність таких споруд залежить від надійності їх анкерування до земної поверхні. Для цього розроблено низку скінчено-елементних моделей споруди у вигляді стрижневої системи засобами програмного комплексу «Ліра-САПР».

При виконанні досліджень встановлено, що геодезичні стрижневі конструкції без анкерування, які тримаються основи тільки силами тертя не працездатні в умовах ураганного вітру. Розглянуто раціональні способи анкерування улаштуванням геошурупів, гвинтових паль та привантаження опорних елементів баластом. Перші два варіанти є достатньо дорогими та, на майданчиках з твердим покриттям в умовах щільної міської забудови, іноді й неможливі. Тому, обрано найбільш раціональний варіант анкерування – улаштуванням баластних систем у п'яти полярно симетричних опорних точках каркасу.

Встановлено, також, що тентове покриття геодезичних куполів не може витримувати вплив ураганного вітру при швидкостях вітру більше 120 км/год.

Магістерська кваліфікаційна робота містить аркушів графічної частини.

Ключові слова: геодезичний купол, напружено-деформований стан, тентове покриття, пересувні планетарії, стрижнева система, втрата стійкості, кліматичні навантаження.

## ABSTRACT

UDC 624.15

Baranetska O.S. Geodetic rod domes. Master's qualification thesis on specialty 192 - "Construction and civil engineering", educational program - "Industrial and civil construction". Vinnytsia: VNTU, 2023. p. Ukraine language Bibliography:40 titles; 31 Fig.; 17 table; 19 sheets of the graphic part.

Have been investigated the stressed-deformed state of geodesic rod domes with an awning cover without a stationary foundation for mobile small architectural forms, pavilions and planetariums in the master's qualification work. Have been founded that the strength, stability and efficiency of such structures depends on the reliability of their anchoring to the earth's surface. Have been developed a number of finite-element models of the structure in the form of a rod system were using the Lira-CAD software complex for this case.

During the research, have been established that geodesic rod structures without anchoring, which are held to the base only by frictional forces, are not operational in hurricane wind conditions. Have been considered the rational methods of anchoring by installing geoscrews, screw piles and loading supporting elements with ballast. The first two options are quite expensive and, on hard surfaces in dense urban areas, sometimes impossible.

Therefore, have been chosen the most rational option of anchoring - the arrangement of ballast systems in five polar symmetrical support points of the frame.

It was also established that the awning covering of geodesic domes cannot withstand the impact of hurricane winds at wind speeds of more than 120 km/h.

The master's qualification work contains sheets of the graphic part.

Key words: geodesic dome, stressed-deformed state, awning covering, mobile planetariums, rod system, loss of stability, climatic loads.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	6
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ СТИРЖНЕВИХ КУПОЛІВ</b>	10
1.1 Актуальність досліджень	10
1.2 Область застосування куполів з металу, бетону та дерева, загалом, та геодезичних стрижневих куполів, зокрема	11
1.3 Аналіз стану питання з проектування сферичних оболонок (куполів)	13
1.4 Основні конструктивні елементи куполів, загалом, та геодезичних стрижневих куполів, зокрема	17
1.5 Спосіб приєднання геодезичних куполів до земної поверхні	19
Висновки до розділу 1	19
<b>РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТРИЖНЕВОГО КУПОЛУ ПІД ДІЄЮ КОМПЛЕКСУ НАВАНТАЖЕНЬ</b>	21
2.1 Загальні відомості	21
2.2 Збір кліматичних навантажень на куполи.	23
2.2.1 Кліматичні показники	23
2.2.2 Навантаження на купол	24
2.3 Моделювання напружено-деформованого стану куполу	39
2.3.1 Теорія роботи стрижневого каркасного куполу під навантаженням.	39
2.3.2 Опис розробленої тривимірної моделі куполу	40
2.3.3 Результати розрахунку куполу на впливи згідно з ДБН В.1.2-2:2006.	46

	5
2.3.4 Оцінка міцності тентового покриття	75
2.3.5 Оцінка міцності болтів	78
Висновки до розділу 2	78
<b>РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОВЕДЕНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКІВ</b>	80
3.1 Урахування особливостей приєднання куполів до земної поверхні при моделюванні.	80
3.2 небезпечні фактори при експлуатації куполу та експлуатаційні обмеження	81
3.3 Конструктивні та технологічні пропозиції з улаштування геодезичних куполів для пересувних планетаріїв	82
Висновки до розділу 3	86
<b>РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b>	88
Висновок до розділу 4	99
<b>ВИСНОВКИ</b>	100
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	102
Додаток А Протокол перевірки МКР на наявність текстових запозичень	
Додаток Б Відомості графічної частини	

## ВСТУП

Купольні системи в будівництві мають довгу (більш ніж 2000 років), багатогранну та активно еволюціонуючу історію. Зазвичай такі системи асоціюються з архітектурними витворами мистецтва Візантії або епохи «Ренесансу», але в сучасному світі вони знаходять найрізноманітніше застосування починаючи готельними комплексами, закінчуючи звичайними малими архітектурними формами.

Одним з видів просторових купольних систем є геодезичні куполи, які у вигляді каркасних стрижневих систем були запатентовані у середині ХХ сторіччя. Геодезичні куполи широко використовуються за кордоном, як тимчасові торговельно-розважальні павільйони, теплиці, елементи декору на покрівлях будівель, конструкції покриття башт та еркерів. Сферична, та, іноді, еліптична, форма геодезичних куполів володіє надзвичайно високою архітектурною виразністю.

Як малі архітектурні форми, геодезичні куполи можуть виготовлятися як з покриттям так і без нього. Конструкції геодезичних систем без покриття в основному використовуються як декоративні малі архітектурні форми і у цій роботі не розглядаються.

В Україні геодезичні куполи почали з'являтися протягом останнього десятиріччя. Основними вітчизняними виробниками на сьогодні є фірми Escord, Cupol-Space (м. Івано-Франківськ), ПП «Кедр» (м. Київ), ТОВ «PromoZR» (м. Запоріжжя), ТОВ «Авіліон» (м. Харків).

Не зважаючи на широке розповсюдження стрижневих каркасних купольних систем залишається багато питань, щодо їх роботи під навантаженням, особливо у розрізі пересувних споруд без стаціонарного фундаменту, тому дослідження, присвячені цій тематиці є доцільними та актуальними.

Метою магістерської роботи є розробка раціональних конструктивних форм геодезичних куполів та їх несучих конструкцій для пересувних споруд з урахуванням різних способів кріплення до земної поверхні.



Для досягнення поставленої мети необхідно виконати комплекс наукових задач, які включають:

- визначення області застосування куполів з металу, бетону та дерева, загалом, та геодезичних стрижневих куполів, зокрема;
- аналіз стану питання з проектування сферичних оболонок (куполів);
- аналіз основних конструктивних елементів куполів, загалом, та геодезичних стрижневих куполів, зокрема та огляд можливих способів кріплення до земної поверхні;
- скінчено-елементне моделювання напружено-деформованого стану геодезичних куполів під дією комплексу навантажень, окреслення принципів роботи каркасу і покриття стрижневих куполів;
- аналіз найбільш небезпечних с точки зору міцності та стійкості ділянок і конструкцій куполів;
- впровадження застосування геодезичних куполів для пересувних планетаріїв.

Актуальність теми полягає в необхідності створення архітектурно виразної, ефективної та економічної стрижневої конструкції для пересувних споруд.

Об'єктом дослідження є перерозподіл внутрішніх зусиль і напружень між елементами каркасу геодезичних куполів з урахуванням його спільної роботи з основою.

Предметом дослідження є напружено-деформований стан геодезичних стрижневих куполів під дією комплексу кліматичних та технологічних навантажень.

Новизна:

- змодельований напружено-деформований стан геодезичних куполів зі сталевим трубчастим каркасом з урахуванням спільної роботи тентового покриття та каркасу та різних способів приєднання каркасів куполів до основи;
- запропоновано декілька раціональних варіантів кріплення такої будівлі до земної поверхні без використання класичних стаціонарних фундаментів, що надає конструкції мобільності.

Практичне значення роботи полягає у:

- розроблені інженерні рішення щодо раціонального кріплення тенту до каркасу геодезичного купола, із забезпеченням максимальну ефективність (не ушкодженість) тентового покриття під дією кліматичних навантажень;
- розроблений спосіб кріплення геодезичного купола до земної поверхні з використанням баластних систем та геодезичних шурупів, визначення економічної та конструктивної доцільності прийнятого способу.

Програма дослідження включає наступні етапи:

- Аналіз фахових літературних джерел, норм та стандартів щодо проектування, технології виготовлення, монтажу та експлуатації геодезичних куполів, в якості пересувної споруди. Оцінка стійкості та безпеки таких конструкцій.
- Дослідження властивостей матеріалів, які можуть бути використані для виготовлення геодезичних куполів та покриття для каркасу. Аналіз стійкості до корозії, механічної міцності та інших параметрів тентів для покриття.
- Розробка аналітичної та скінчено-елементної моделей напружено-деформованого стану конструкцій геодезичного купола, покритого тентом без стаціонарного фундаменту.
- Пошук раціональних конструктивних способів кріплення каркасів геодезичних куполів до основ.
- Розрахунок кошторисної вартості способів кріплення купола до земної поверхні.

Апробація результатів магістерської роботи.

Результати магістерської роботи доповідалися на двох наукових конференціях:

1. ІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, яка відбулася у Вінниця, 14-23 березня 2023 р.
2. Міжнародній фаховій конференції «Енергоефективність в галузях економіки України-2023», м. Вінниця, 20-24 листопада 2023 р.

Публікації.

За матеріалами магістерської роботи опубліковано три наукові роботи, одна з яких – у фаховому виданні України [5, 6, 7]:

1. Баранецька О. С. Рациональні геодезичні стрижневі купольні системи для пересувних планетаріїв [Електронний ресурс] / В. О. Попов, О. С. Баранецька // Матеріали ІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ : Збірник доповідей, Вінниця, 14-23 березня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. С. 1480 – 1484. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/18983> [5]

2. Баранецька О. С. Моделювання напружено-деформованого стану металевого стрижневого каркасу геодезичного куполу для раціонального проектування / В. О. Попов, А. В. Попова, О. С. Баранецька // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2023-2. С. 5 – 19 [6].

3. Баранецька О. С. Дослідження напружено-деформованого стану металевого каркасу геодезичного стрижневого куполу під дією вітрового навантаження [Електронний ресурс] / В. О. Попов, О. С. Баранецька // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність в галузях економіки України-2023», м. Вінниця, 20-24 листопада 2023 р. : електронне мережне наукове видання. – Електрон. текст. дані. – 2023. – С. 35–43 [7].

Ще одна стаття подана до опублікування.

## РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ СТРИЖНЕВИХ КУПОЛІВ

### 1.1 Актуальність досліджень

Кожна будівля, не виключенням є і пересувні тимчасові споруди, має органічно поєднуватись з навколишнім середовищем. Купольні системи – мають яскраву архітектурну виразність, що може надати благородного вигляду будь-якій забудові. Крім привабливості важливим аспектом є просторова жорсткість, міцність та стійкість конструкції. Купольні конструкції – це у дійсності об’ємна арочна конструкція, тому, відповідно, набуває якостей, що властиві аркам, тобто в них виникають стискальні напруги, в той самий час нижній край купола спирається на розтягнуте кільце, що сприймає розпір.

В сьогоденні український споживач використовує каркасні купольні системи, як власного виробництва, так і закордонні аналоги. Відтак, незважаючи на наростаючу популярність таких конструкцій, відсутнє фундаментальне наукове підґрунтя в аспекті раціонального проектування геодезичних куполів. Достименно не дослідженими залишаються конструктивні питання надійного тимчасового приєднання купольних систем до поверхні землі, не описано розподіл внутрішніх зусиль у елементах каркасно-стрижневих систем в залежності від обраного способу анкерування до поверхні, впливи кліматичних навантажень на тентове покриття, а, також, не визначеними є способи підвищення довговічності та вдосконалення 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 [5 – 7]. Тому дослідження, присвячені раціональному проектуванню геодезичних купольних систем для проєкційних тривимірних кінотеатрів є доцільними та актуальними.

Очевидним є факт, що будівлі планетаріїв в нашій країні досить застарілі. В магістерській роботі запропонований та досліджений сучасний підхід до створення пересувного планетарію. Варто зазначити екологічність такої будівлі, оскільки встановлюється вона тимчасово і мінімально порушує навколишню екосередовище.

Підсумовуючи вищезазначене 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.

## **1.2 Область застосування куполів з металу, бетону та дерева, загалом, та геодезичних стрижневих куполів, зокрема**

Основна область застосування куполів – просторове покриття будівель, споруд, малих архітектурних форм. Такі покриття дозволяють перекрити значні прольоти. Прольоти які можуть перекривати залізобетонні куполи досягають 200 м в діаметрі. До перших будівель купольного типу з залізобетону з радіально-кільцевої системою масивних ребер можна віднести "Зал сторіччя" М. Берга (Max Berg) діаметром 65 м, побудований в 1911 - 1913 рр. у Вроцлаві. Багато архітекторів вважають, що в даної конструкції відсутня легкість, але фото будівлі не передає її обтяження.

Залізобетонний купол є родоначальником геодезичних куполів. Перший купол, наближений до геодезичного, був розроблений для планетарію головним інженером оптичної компанії Carl Zeiss Вальтером Бауерсфельдом після Першої світової війни. А вперше запатентованим був невеликий за розміром купол, побудований фірмою Dyckerhoff та Wudmann на даху заводу Zeiss у Єні, Німеччина. Пізніше (у липні 1926 року), на тому ж даху, змонтували перший великий купол, який отримав назву «Диво Єні».

Варто відзначити, що зведення монолітного залізобетонного купола дуже затратне. Залізобетонні збірномонолітні куполи, які споруджуються без риштувань

призначені для застосування в храмовому будівництві. Їхнє спорудження передбачено проводити без риштувань. Конструкція куполів ребриста і складається із збірних безребрових залізо-бетонних плит подвійної кривизни і жорстких арматурних каркасів для монолітних залізобетонних меридіальних і кінцевих ребер, які під час спорудження сприймають всі навантаження [4].

Дерев'яні купольні конструкції досить часто використовують для покриття будівель спортивного призначення (криті стадіони, спортивні зали тощо).

З великих споруд, виконаних з дерева, які найбільш часто потрапляють в різні довідники та путівники, можна вказати на дерев'яний купол стадіону Північно-Мічиганського університету, США, який був прийнятий в експлуатацію в 1991 р і на той час був найбільшим дерев'яним куполом в світі з діаметром 163,4 м. По конструкції це геодезичний купол з 781 дерев'яної балкою. Купол запроектований на снігове навантаження в 2,87 кПа і швидкість вітру в 130 км / ч.

Компанія Western Wood Structures, Inc., що працює в області проектування ребристо-кільцевих дерев'яних куполів, вперше побудувала в Японії купол серії "VARAX dome", розрахований на сприйняття дуже великих снігових навантажень і сейсмічних впливів. Огороджувальні конструкції купола діаметром 36,6 м спочивають па трьох системах ребер.

Один з найбільших дерев'яних куполів світу розташований в м Оodate (Японія). Його розміри в плані - 178 x 157 м в головних осях, висота - 52 м. Він більше, ніж купол в Такомі довжиною 160 м уздовж однієї з осей і більше купола, зображеного на Купол в Оodate запроектований архітекторами фірми Toyo Ito & Associates, а побудований Takenaka Corporation (1995-1997). Тefлонова плівка покриває купол зверху. Купол використовується як спортивна споруда і як місце проведення багатолюдних заходів [ ].

Металеві куполи застосовуються для просторового покриття будівель, архітектурної прикраси або ж як самостійна будівля (торгівельний павільйон, планетарій, альтанка тощо). Металеві куполи використовували також для спеціалізованих цілей: 21 Дистанційний канал раннього попередження (Канада, 1956 рік), кайзерські алюмінієві куполи (побудовані по всій території США),

метеорологічні обсерваторії та сховища тощо. В 2000 році в Чілі було побудовано перший в світі геодезичний купольний готель.

Підсумовуючи, варто відзначити досить широке застосування куполів в сучасному світі, що давно не обмежується використанням купола як покрівлі і все більш активне використання купола як самостійної будівлі.

### 1.3 Аналіз стану питання з проектування сферичних оболонок (куполів)

Конструкція купола – це оболонка позитивної гауссової кривизни. Такі покриття найчастіше застосовують в будівлях ,що мають круглий план, але не виключення і застосування з більш складним планом – овальним, або наближеним до нього ( багатокутним або довільним, зумовленим архітектурно-композиційними вимогами).

В більшості випадків образ купола приймається напівсферичним, що значно спрощує його виготовлення. За конструктивно-компонувальними ознаками розрізняють ребристі, сітчасті і панельні види куполів. ( Рис. 1.1)

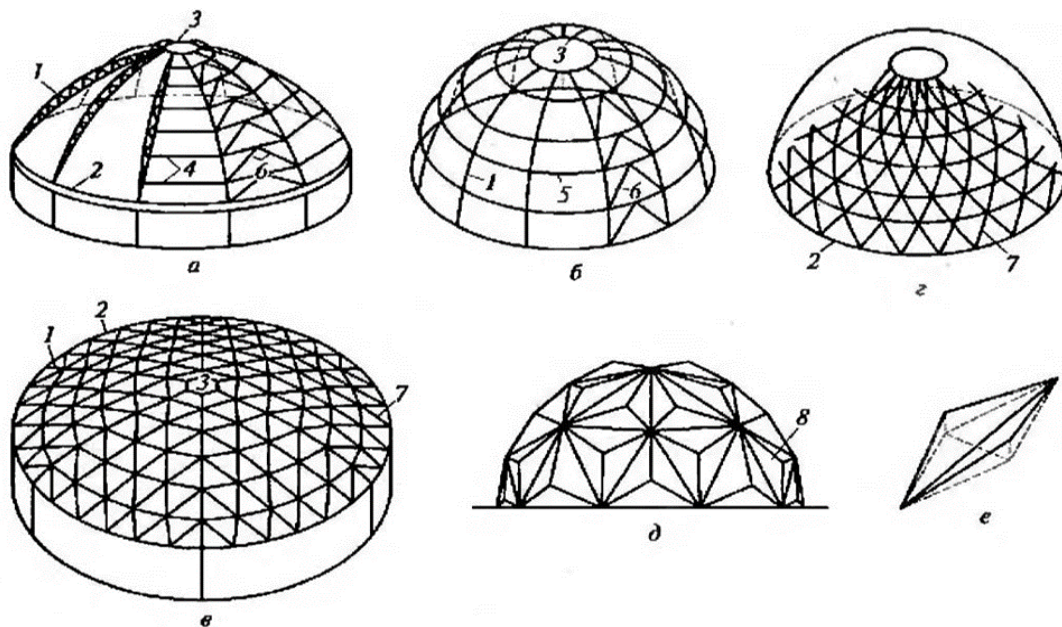


Рисунок 1.1 – Типи куполів:

а – ребристий; б – ребристо-кільцевий; в – ребристо-сітчастий; г – сітчастий; д – панельний; е – ромбічна гнута панель; 1 – ребра; 2 – нижнє опорне кільце; 3 – верхнє кільце; 4 – прого́ни; 5 – проміжні кільця; 6 – зв’язки; 7 – сітка; 8 – гнуті панелі з металевого листа.

Для ребристих куполів компоновка ребер аналогічна компоновці арок. Ребра суцільного перерізу тяжчі, але більш технологічні у виготовленні ніж порожнисті. Верхнє стиснуте кільце виконує функцію з'єднання напіварок в вершині купола. Діаметр його зазвичай приймають мінімально необхідним для розміщення елементів кріплення ребер до кільця. Якщо наявна ліхтарна надбудова іноді діаметр кільця збільшують, відповідно до розмірів ліхтаря.

Для підвищення жорсткості купола бажано жорстке закріплення ребер до верхнього кільця, що буде викликати крім стиску кручення кільця. В звязку з цим збільшення діаметра кільця буде ускладнювати проблему його стійкості. Для підвищення жорсткості та стійкості кільце іноді розкріплюють внутрішніми розпірками.

Нижнє кільце працює на розтяг від розпору арок купола. При розміщенні його на стінах або колонах необхідно забезпечити вільне його деформування від розпора і обмеження жорсткості зміщення від вітрового навантаження. При частому розміщенні ребер нижнє кільце може мати в плані круглу форму, при рідкому – форму багатокутника за кількістю ребер, що має виключити прогин, зумовлений кривизною кільця.

Опорний вузол слід проектувати так, щоб рівнодіюча тиску від напіварки проходила через центр прогину опрного кільця, що виключить його кручення. При відсутності у будівлі вертикальних стін ребра купола можна спирати безпосередньо на фундамент. Для полегшення опірних конструкцій кільця або фундаменту зєднання ребер на опорах приймається шарнірним. В цьому випадку ребра купола розраховуються на симетричне вертикальне навантаження за схемою пласкої двохшарнірної арки з вантажною площею у вигляді двох трикутників. При розрахунку на асиметричне горизонтальне навантаження до коника арки слід додати пружну опору. Жорсткість цієї опри забезпечуються арками, що сходяться до верхнього кільця, на які вітрове навантаження діє симетрично, не викликаючи горизонтальних переміщень.



Якщо ребра з кільцями з'єднати в місцях їх перетину, то вони будуть працювати спільно, утворивши єдиний несучий каркас покриття. Такий купол називається ребристо-кільцевим.

З'єднання кілець з ребрами може бути як шарнірним так і жорстким. В останньому випадку несучу систему купола можна назвати ребристо-рамною. При шарнірному з'єднанні кілець з ребрами необхідне встановлення зав'язків між ребрами, при жорстких з'єднаннях зв'язки не обов'язкові.

Проміжні кільця подібно опорному кільцю будуть створювати додаткові зв'язки ребрам купола.

За рахунок включення кілець в роботу куполу зменшується загальні витрати металу для конструкції покриття і підвищується живучість каркасу, однак дещо ускладнюється його виготовлення та підвищується його вразливість до змін температури.

Найпростіше і найбільш економічно доцільне рішення виходить коли для елементів купола можна використовувати прокатні профілі. В даному випадку з'єднання ребер з прогонами можна конструювати як шарнірне з'єднання в балкових системах.

У ребристих і в ребристо-кільцевих системах куполів визначною властивістю є концентрація матеріалу в основних несучих елементах – ребрах. Простір міжними заповнюється покрівельними елементами – прогонами, допоміжними ребрами, настилом. За тим же алгоритмом конструюються ребристо-сітчастий купол.

Формоутворення поверхні сітчастого куполу може виглядати як розвиток структурної плити або циліндричної оболонки шляхом надання їм відповідної кривизни в двох напрямках. Основною проблематикою при цьому залишається вибір типу сітки та конструкції вузлів.

Форма сітки визначає число типорозмірів стрижнів та вузлових елементів, бажано щоб їхня кількість була мінімальною, хоча архітектурні вимоги, що висуваються до таких покриттів, можуть зумовлювати протилежну тенденцію.

Останнім часом набули значного поширення геодезичні сітки куполів. Базова сітка на поверхні сфери формується геодезичними лініями, проведеними через

вершини вписаного ікосаедра (20-гранника) і 20 однакових рівносторонніх сферичних трикутників, що утворюються на поверхні.

Наступне подрібнення сітки відбувається шляхом ділення сторін базових трикутників на рівні частини і з'єднання їх геодезичними лініями. Число типорозмірів стрижнів, що виходить при діленні базової сітки, дорівнює подвоєному числу ділень її сторін. При однократному діленні буде два типорозміри стрижнів, при трикратному – шість типорозмірів.

Найзагальнішим способом побудови геодезичної сітки для довільної поверхні обертання є спосіб похилих утворюючих. Похилою утворюючою може бути будь-яка крива на заданій поверхні обертання, що не лежать в одній площині з віссю обертання. Якщо дві такі утворюючі, що нахилені в різні боки, обертати з постійним кутовим кроком, то точки перетину утворюють шукану сітку.

Також існує проєкційний спосіб формування сіток куполів довільної форми. Побудувавши сітку для простих поверхонь, можна потім спроектувати її на задану поверхню або паралельними променями, або вихідними з деякої точки, що не лежить на вказаних поверхностях.

Перехід від ребристого куполу до сітчастого з включенням в роботу сітки елементів покрівельного огороження несе в собі ідею «розмазування» матеріалу по поверхні покриття, ідею деконцентрації матеріалу.

В металевих куполах при високій міцності конструкційного матеріалу ця тенденція загострює проблему до стійкості куполів (місцевої і загальної). Однак вигоди від суміщення несучих і огорожуючих конструкцій спонукають інженерів до пошуку компромісних оптимальних рішень. Прикладом може слугувати конструкція панельного купола. Купол збирається із гнутих або гнутоштампованих елементів (панелей) виконаних із сталевих або алюмінієвих листів товщиною від 2 до 4 мм. По контуру панелей виконується відборткування, за допомогою якої панелі можуть з'єднуватись при монтажі болтами. За рахунок перегину листів панель набуває гнучку жорсткість, що необхідна для забезпечення загальної стійкості купола. Водночас ребра панелей обмежують розміри плоских тонкостінних сегментів, забезпечуючи їхню місцеву стійкість при стиску.

Ребра з'єднаних панелей на поверхні купола утворюють малюнок, аналогічний малюнку сітчастого куполу, тому пошук геометричної форми панелі вирішується аналогічними методами.

Для збільшення жорсткості і несучої здатності купола між вершинами панелей можна поставити стрижні, які в сукупності утворюють додаткову сітку. Подібну конструктивну форму можна віднести до панельно-сітчастого куполу.

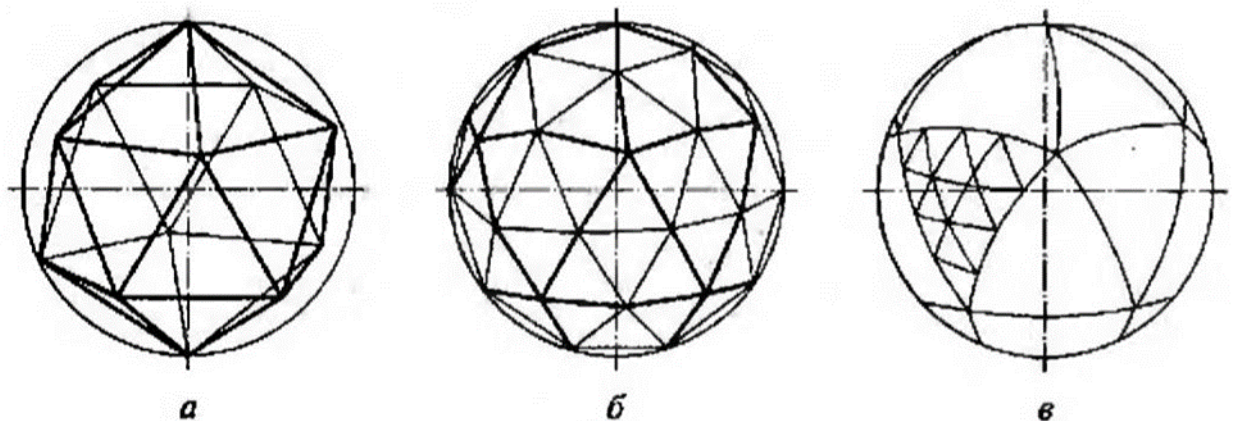


Рисунок 1.2 – Формування геодезичної сітки на основі ікосаїдра (дванадцятигранника):

а – базова сітка ( 20 граней); б – одноразове ділення (80 граней); в – трьохразове ділення (320 граней).

#### **1.4 Основні конструктивні елементи куполів, загалом, та геодезичних стрижневих куполів, зокрема**

Ребристі куполи представлені радіально-арочною системою, в якими головними несучими елементами є ребра у вигляді напіварок, що з'єднані між собою знизу і зверху опірними кільцями. До арок кріпляться прогони, що підтримують покрівлю. Зв'язки забезпечують просторову жорсткість несучого каркасу куполу. Вони встановлюються між суміжними напіварками, і їх має бути не менше двох на все покриття.

Стрижні сітчастих куполів в більшості випадків виготовляються з труб. Вузлові елементи виготовляють у вигляді штампованих фасонок, шарових вставок та інших форм, подібних вузлам пласких структур. (Рис. 1.3 а-в, е)

В несучу систему куполів може бути включена огорожуюча конструкція, що утворена сталевими або алюмінієвими листами.

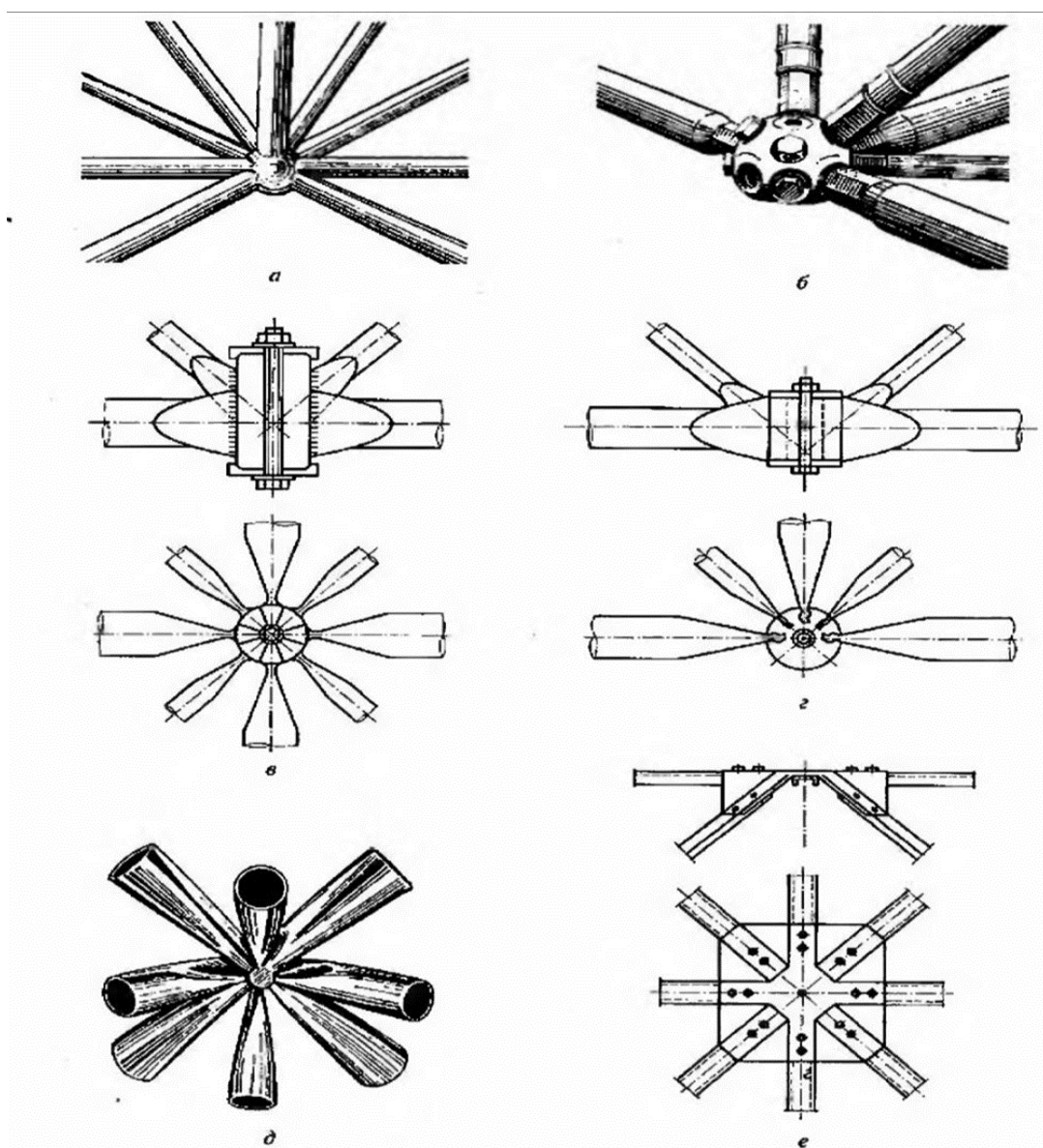


Рисунок 1.3 – Вузли структурних конструкцій

а – з шаровою вставкою б – на гвинтах; в – з анкерними шайбами; г – циліндричні з фігурними вирізами; д – зварні; е – з фігурною фасонкою.

## **1.5 Спосіб приєднання геодезичних куполів до земної поверхні**

Спосіб приєднання конструкції можливий у варіанті привантаження всіх опорних точок баластом невеликої ваги та роботу опорних конструкцій від зміщення тільки силами тертя. Баласта мають бути рівномірно розподілені по всіх опорних точках. Баласт має бути прикріплений до опорних точок. Як варіант, замість баласту можуть бути використані геошурупи, що тримають відповідну вагу на висмикування.

Можливим варіантом кріплення конструкції є варіант привантаження п'яти полярно симетричних опорних точок баластом великої ваги. Як варіант замість баласту можуть використовуватись гвинтові палі, які тримають на висмикування відповідну вагу з урахуванням сервісних коефіцієнтів.

Варіант кріплення конструкції до стаціонарних фундаментів, або до жорсткої платформи). Жорсткість платформи при цьому має бути на порядок більша жорсткості каркасу куполу. Прикладом такої платформи є жорсткий диск у вигляді залізобетонного армованого кільця. Як варіант допускається виготовлення платформи зі сталевих полегшених рам з привантаженням баластом.

### **Висновки по розділу 1**

Грунтуючись на викладеній в розділі інформації можна зробити висновок, що існує потреба в подальшому дослідженні поведінки конструкцій куполів, взагалі, та геодезичних стрижневих куполів, зокрема, під навантаженням.

У розділі було підкреслено можливість широкого застосування геодезичних стрижневих систем не лише в якості покриття, але й в якості самостійної будівлі найрізноманітнішого призначення, для пересувних споруд в тому числі.

Оскільки пересувні споруди відносяться до малих архітектурних форм, важливим є надати такій будівлі архітектурної виразності для органічного поєднання з навколишнім середовищем будь-якого типу, з чим чудово справляється купольна система. Тому основним аспектом дослідження є прийняття

ефективних та раціональних конструкторських рішень купольного будинку, для подальшого ефективного застосування в будівельній практиці.

Таким чином, розробка комплексної теорії для проектування геодезичних стрижневих систем, є важливим напрямком досліджень. Ця теорія повинна враховувати всі можливі умови кліматичних навантажень, а також ефективно моделювати реакцію матеріалів каркасу та тентового покриття на ці навантаження.

Розробка теорії підвищить безпеку, надійність, ефективність та довговічність мобільних будівель купольного типу і сприятиме активному розвитку їх використання.

Подальші наукові дослідження в цьому напрямку сприятимуть прогресу та розвитку сучасних технологій у виготовленні мобільних та екологічних споруд різного призначення, зокрема розважального характеру, оскільки такі будівлі чинять мінімальний вплив на навколишнє середовище.

Оскільки конструкція геодезичних куполів архітектурно та конструктивно складна, не площинна, багатoelementна, дослідження напружено-деформованого стану куполів пропонується виконувати з використанням просторового моделювання із залученням програмних комплексів.

## РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТРИЖНЕВИХ КУПОЛІВ ПІД ДІЄЮ КОМПЛЕКСУ НАВАНТАЖЕНЬ

#### 2.1 Загальні відомості

Моделювання напружено-деформованого стану купольної системи виконаємо на прикладі споруди, яка виробляється вітчизняним виробником ASE Myplanetarium (м. Вінниця). Виробник поставляє подібні куполи на експорт для малих архітектурних форм тривимірних оглядових павільйонів пересувних планетаріїв.

Згідно з прийнятим виробником конструктивним рішенням конструкція споруди, що розглядається, являє собою циліндро-сферичний купол, виготовлений за каркасно-стрижневою технологією з чарунок у вигляді трикутників, сформованих трубчастими елементами, що з'єднані між собою метизами М14 класу міцності 8.8 один болт на елемент через металеві листові з'єднувачі. В основі куполу, а також, в рівні стику циліндричної та сферичної частин улаштовані, відповідно, опорне та формоутворююче кільця у вигляді квадратної гнуто-зварної труби. Купол, що розглядається виготовляються діаметром циліндричної частини 13,5 м ( $R = 6,75$  м).

Стрижневі елементи сферичної частини куполу, опорного та формоутворюючого кільця запроектовані з електрозварних труб. Діаметр та матеріал встановлюється розрахунком скінчено-елементної моделі.

Каркас вхідної групи геодезичного куполу діаметром циліндричної частини 13,5 м вирішений у вигляді замкнених кілець з труб діаметром 50 мм товщиною стінки 2 мм. Всього у конструкції куполу передбачено два дверних прорізи діаметром 2,9 м.

Оскільки геодезичний купол виготовляють без стаціонарного фундаменту і споруда є тимчасовою, збірно-розбірною та пересувною, відповідно, на цю споруду розповсюджуються вимоги ДБН В.1.2-14-2018 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд» [8], як для тимчасових

малих архітектурних форм (клас наслідків СС-1). Коефіцієнт надійності для першої групи граничних станів.

Основне призначення куполу – підтримання конструкцій легкого екрану, на який проектується зоряне небо, а також, тимчасовий захист відвідувачів від кліматичних впливів. Загальні технічні вимоги згідно з керівництвом з експлуатації подібні до вимог, що пред'являються до полегшених павільйонів. З основними технічними характеристиками куполу та тентового покриття можна ознайомитись в таблицях 2.1 та 2.2

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики куполу (початок)

Характеристика	Значення
Тип	Сферо-циліндричний каркасний купол
Гранична висота (стріла купола)	до 7,75 м
Діаметр циліндричної частини	До 13,5 м
Матеріал покриття	Тентове, ПВХ, 0,5 мм
Гранична вага тента	Близько 300 кг для куполів діаметром 13,5 м
Площа тентового покриття	Близько 300 м <sup>2</sup> для куполів діаметром 13,5 м
Матеріал типових стрижневих елементів, опорне та формоутворююче кільця	Горячекатані труби, діаметр і матеріал яких встановлюється розрахунком
Матеріал каркасу вхідної групи	Тр. горячекатана ø50 x 2 за ГОСТ 8732 зі Сталі 20
Монтажні метизи стикування елементів	Орієнтовно М12...М16, клас не нижче 8.8



Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики куполу (закінчення)

Загальна вага технологічного обладнання, що підвішується всередині	Близько 330 кг. Уточнюється згідно з призначенням споруди
Загальна вага монтажних метизів	Орієнтовно 30 кг
Загальна вага всіх металоконструкцій	У першому наближенні, згідно з даними виробника – 2 т
Обладнання	Система кондиціонування повітря
Орієнтовний термін експлуатації	8 років

Таблиця 2.2 – Вибірка з фізико-механічних характеристик тентового ПВХ покриття.

Характеристика	Значення
Товщина тентового покриття	0,5 мм
Межа міцності при розтязі	40 МПа
Модуль пружності при розтязі	2700 МПа
Коефіцієнт Пуассона	0,4
Вага 1 м <sup>2</sup> покриття	0,85 кг
Густина	1,7 т/м <sup>3</sup>

## 2.2 Збір кліматичних навантажень на куполи

### 2.2.1 Кліматичні показники

Тимчасова споруда купол, згідно з паспортом, зводиться тільки у першій (I) та другій (II) кліматичних зонах.

Споруда геодезичного куполу підпадає під вимоги норм ДБНВ.1.2-14-2018 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної

безпеки будівель і споруд» [8]. Для будівель і споруд класу наслідків СС-1 (незначні наслідки), коефіцієнт надійності  $\gamma_n = 1,0$ . Паспортний (сервісний) коефіцієнт запасу споруди  $K = 1,1$ . Тому, у всіх розрахунках прийнято загальний коефіцієнт надійності –  $\gamma_n \cdot K = 1,0 \cdot 1,1 = 1,1$ .

### 2.2.2 Навантаження на купол

Навантаження на купол залежить від місця розташування будівельного майданчика. Загалом, до навантажень на споруду, яка зводиться на відкритому повітрі належать:

- постійні впливи (власна вага елементів купола);
- тимчасові кліматичні впливи (вітер, сніг, ожеледь, температурні впливи);
- ненормовані аварійні впливи.

Вибрано і розглянуто різні комбінації тимчасових навантажень на купол, які наведені у таблиці 3.

Таблиця 2.3 – Основні розрахункові сполучення навантажень на купол

№ і тип завантаження	Основні сполучення завантажень								
	1-ше основне сполучення					2-ге основне сполучення			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Власна вага Куполу	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2. Сніговий вплив	0	1	0	0	0	1	1	1	0
3. Вітровий вплив (27 м/с)	0	0	1 (0)	0	0	0	1	0	1
4. Ожеледь	0	0	0	1	1	1	0	1	1
5. Вітер при ожеледі	0	0	0	0	1	0	0	1	1
6. Температурні впливи	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7. Граничний вітровий вплив на тент (20 м/с)	0	0	0 (1)	0	0	0	0	0	0

З розглянутих комбінацій було обрано найбільш не вигідні варіанти.

Варіант 1 (комбінація 2) – власна Куполу + вітровий вплив (27 м/с), (або, для тента, 20 м/с).

Варіант 2 (комбінація 5) – власна Куполу + ожеледь + сніг.

Згідно з паспортом та керівництвом з експлуатації при роботі допустиме вітрове навантаження на покриття Куполу (тент) не повинно перевищувати  $V_{f1} = 20 \text{ м/с}$ .

- Власна вага конструкцій куполу, покриття, внутрішнього екрану:

Згідно з паспортними даними вага металоконструкцій куполу складає  $M_{куп} = 2001 \text{ кг}$ . Вага монтажних метизів  $M_{мет} = 20 \text{ кг}$ . Вага тенту покриття  $M_{тент} = 300 \text{ кг}$ . Вага внутрішньої оболонки (екрану) та технологічного устаткування –  $M_{екр} = 330 \text{ кг}$

Загальна вага металоконструкцій з урахуванням монтажних метизів:  $M_{МК} = M_{куп} + M_{мет} = 2001 + 20 = 2021 \text{ (кг)}$ . Коефіцієнт надійності за навантаженням для металоконструкцій  $\gamma_{fm1} = 1,05$  [8, с. 9, табл. 5.1].

Загальна вага конструкцій покриття та внутрішнього опорядження:

$$M_{покp} = M_{тент} + M_{екр} = 300 + 330 = 630 \text{ (кг)}$$

Коефіцієнт надійності на конструкції покриття та технологічного оснащення  $\gamma_{fm2} = 1,2$ .

Загальна вага усіх конструкцій з урахуванням коефіцієнтів надійності за навантаженням та сервісного коефіцієнта  $\gamma_1 = K = 1,1$ :

$$G = \gamma_1 \cdot g \cdot (\gamma_{fm1} \cdot M_{МК} + \gamma_{fm2} \cdot M_{покp}) = 1,1 \cdot 10 \cdot (2021 \cdot 1,05 + 630 \cdot 1,2) \cdot 10^{-3} = 31,771 \text{ (кН)}.$$

Це навантаження прикладаємо до конструкцій купола, вводячи гравітаційний коефіцієнт на програмну власну вагу стрижневих конструкцій:

$K_g = G / G_0 = 31,77 / 23,27 = 1,365$ , тут  $G_0 = 23,27 \text{ кН}$  – вага конструкцій моделі, визначена автоматично.

Навантаження від вітру.

Гранична швидкість вітру, яку, згідно з керівництвом з експлуатації, має витримувати покриття куполу, складає  $V_{f1} = 20 \text{ м/с}$ .

Гранична швидкість вітру, яку, згідно з керівництвом з експлуатації, має витримувати металокаркас та фундаменти  $V_{f0} = 60 \text{ миль/год} = 27 \text{ м/с}$ .

Знаходимо граничний тиск на тентове покриття куполу:

$$W_{11} = 0,61 \cdot V_{f1}^2 = 0,61 \cdot 20^2 = 244 \text{ (Па)} = 0,244 \text{ (кПа)}.$$

Граничне розрахункове вітрове навантаження згідно з ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи», [9, с.24]:

$$W_m = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C \text{ [кН/м}^2\text{]}, \quad (2.1)$$

де  $W_{0\max} = 0,5 \text{ кПа}$  (3 вітровий район);  $\gamma_{fm} = 0,64$  – коефіцієнт надійності за граничним значенням вітрового навантаження (приймаємо за терміном експлуатації згідно з паспортом – 8 років); тип місцевості I (можливе встановлення на відкритій місцевості).

$C$  – коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$C = C_{aer} \cdot C_h \cdot C_{alt} \cdot C_{rel} \cdot C_{dir} \cdot C_d, \quad (2.2)$$

де  $C_{aer}$  – аеродинамічний коефіцієнт, що визначається згідно з рис. 2 та табл. 4;

$C_h$  – коефіцієнт висоти споруди (таблиця 9.02 [9]). Для споруди малої по висоті (менше 10 м), на відмітці 5 м  $C_{h,5} = 1,4$ , на відмітці 10 м  $C_{h,10} = 1,8$ , на відмітці верхівки (7,75 м) інтерполяцією  $C_{h,7.75} = 1,58$ . Отже,  $C_h = 1,4 \dots 1,58$ ;

$C_{alt}$  – 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 згідно зі змінами № 1 до [10] від 1 жовтня 2007 року).

Для знаходження аеродинамічного коефіцієнта купола слід визначити число Рейнольдса:

$$Re = 0,88 \cdot d \cdot \sqrt{W_0 \cdot C_h \cdot \gamma_{fm}} = 0,88 \cdot 13,5 \cdot \sqrt{500 \cdot 1,4 \cdot 0,64 \cdot 10^5} = 251 \cdot 10^5 > 4 \cdot 10^5$$

Для циліндричної частини купола із співвідношенням висоти (1,6 м) до діаметра (13,5 м)  $h_1 / D = 1,6 / 13,5 = 0,12$ :  $k_1 = 0,8$ ,  $C_\beta = 1$ , при  $\beta > 0$  та  $C_\beta = 0,8$ , при  $\beta < 0$ .  $C_{aer} = C_{e1} = k \cdot C_\beta = (1 \dots 0,8) \cdot (+1,0 \dots -1,25) = (+1 \dots -1)$ .

Для сферичної частини купола з кутом при основі сегмента сфери  $\beta = 5^\circ$ :

$$C_{aer} = C_e = (+0,94 \dots -1,25).$$

Результати розрахунку вітрового навантаження на елементи куполу  $W_m(\beta)$  зведені до таблиці 2.4. З огляду на дані таблиці 4 у кожній точці куполу діє різний тиск вітру. Для спрощення модель тиску, зображену на рис. 2.2 моделюємо спрощеними умовно рівномірно розподіленими впливами, які створюють на споруду аналогічний ефект (показано на рис. 2.1 та рис. 2.2 пунктиром).

Розраховуємо спрощений варіант прикладання вітрових навантажень (без моделювання тенту).

Вітрові впливи прикладаємо до стрижнів у відповідності до їх відмітки та вантажної площі, що припадає на один стрижень.

Таблиця 2.4 – Розподіл коефіцієнтів аеродинамічності та граничного тиску (відтоку) вітру в залежності від кута вітрового впливу відносно споруди для дійсної та спрощеної моделі (початок).

β, град	Дійсна модель		Спрощена модель		
	$C_{aer}$	$W_m$ , кН/м <sup>2</sup>	$C_{aer}'$	$W_m'$ , кН/м <sup>2</sup>	Тиск на тент при швидкості вітру 20 м/с, $W_m''$ , кН/м <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6
Циліндр з відмітки 0.000 до відмітки 1,6 м					
0	+1,0	+0,448	+0,7	+0,313	+0,171
15	+0,9	+0,403	+0,7	+0,313	+0,171
30	+0,4	+0,179	+0,7	+0,313	+0,171
40	0	0	+0,7 (-0,7)	+0,313 (-0,313)	+0,171 (-0,171)
50	-0,64	-0,287	-0,7	-0,313	-0,171
75	-1,0	-0,448	-0,7	-0,313	-0,171
90	-0,8	-0,358	-0,7	-0,313	-0,171
105	-0,48	-0,215	-0,7 (-0,35)	-0,313 (-0,157)	-0,171 (-0,085)
120	-0,32	-0,143	-0,35	-0,157	-0,085
180	-0,32	-0,143	-0,35	-0,157	-0,085
Сфера вище відмітки 1,6 м до відмітки 7,75 м					
0	+1,0	+0,448	+0,7	+0,314	+0,171
5	+0,94	+0,421	+0,7	+0,314	+0,171
15	+0,8	+0,359	+0,7	+0,314	+0,171
30	+0,4	+0,180	+0,7	+0,314	+0,171
40	0	0	+0,7 (-0,9)	+0,314 (-0,403)	+0,171 (-0,220)
45	-0,2	-0,090	-0,9	-0,403	-0,220
60	-0,8	-0,359	-0,9	-0,403	-0,220
75	-1,2	-0,538	-0,9	-0,403	-0,220
90	-1,25	-0,560	-0,9	-0,403	-0,220

Таблиця 2.4 – Розподіл коефіцієнтів аеродинамічності та граничного тиску (відтоку) вітру в залежності від кута вітрового впливу відносно споруди для дійсної та спрощеної моделі (закінчення).

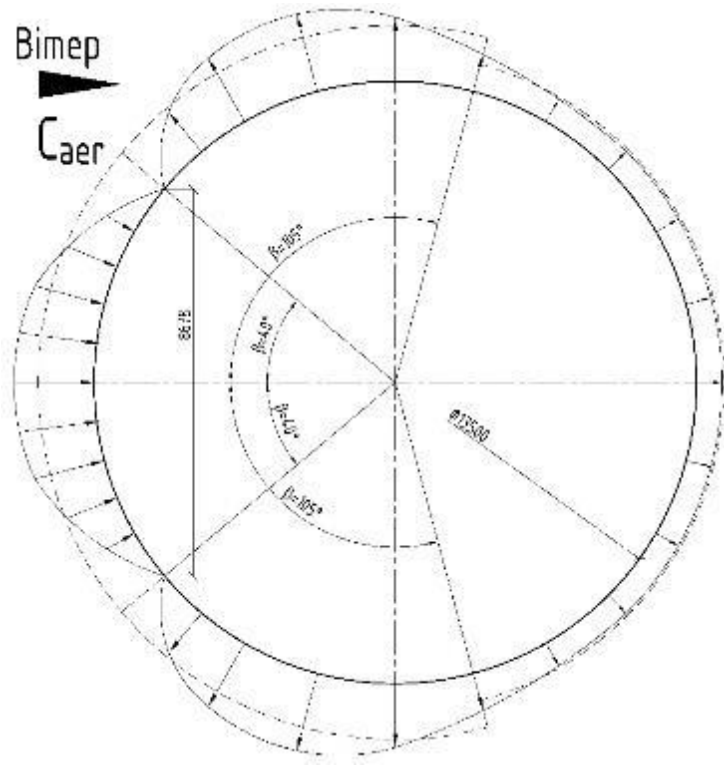
1	2	3	4	5	6
105	-1,0	-0,448	-0,9	-0,403	-0,220
120	-0,6	-0,270	-0,9	-0,403	-0,220
135	-0,2	-0,090	-0,9	-0,403	-0,220
142	0	0	-0,9 (+0,3)	-0,403 (+0,135)	-0,220 (+0,073)
150	+0,2	+0,090	+0,3	+0,135	+0,073
175	+0,3	+0,135	+0,3	+0,135	+0,073
180	+0,4	+0,180	+0,3	+0,135	+0,073

Середню вантажну площу одного стрижня легко визначити як загальна площа поверхні тентового покриття  $\sum A = 330 \text{ м}^2$  розділити на загальну кількість стрижнів, без урахування опорних,  $n_w$ :

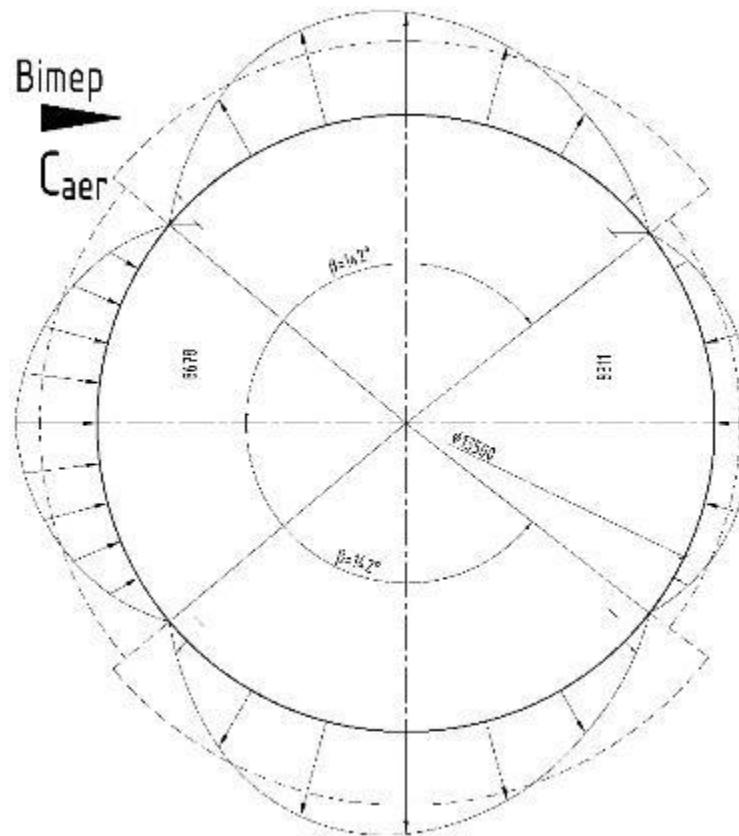
$$A_{w, \text{cep}} = \frac{\sum A}{n_w} = \frac{330}{375} = 0,9 \text{ (м}^2\text{)}.$$

В середньому на 1 стрижень буде припадати рівномірно розподілене по довжині навантаження, яке, беручи до увагу середню довжину елемента  $l_{w, \text{cep}} = 1,5 \text{ м}$ , буде складати:

$$q_{w, \text{cep}} = W_m \cdot A_{w, \text{cep}} / l_{w, \text{cep}} = C_h \cdot C_{aer} \cdot 0,32 \cdot 0,9 / 1,5 = 0,192 \cdot C_h \cdot C_{aer}, \text{ (кН / м)}.$$



а)



б)

Рисунок 2.1 – Схема, що ілюструє розподіл аеродинамічних коефіцієнтів для знаходження вітрового тиску на купол згідно з ДБН В.1.2-2:2006 в плані:

а – до відмітки 1,6 м, б – на відмітках від 1,6 до 5,0 м.



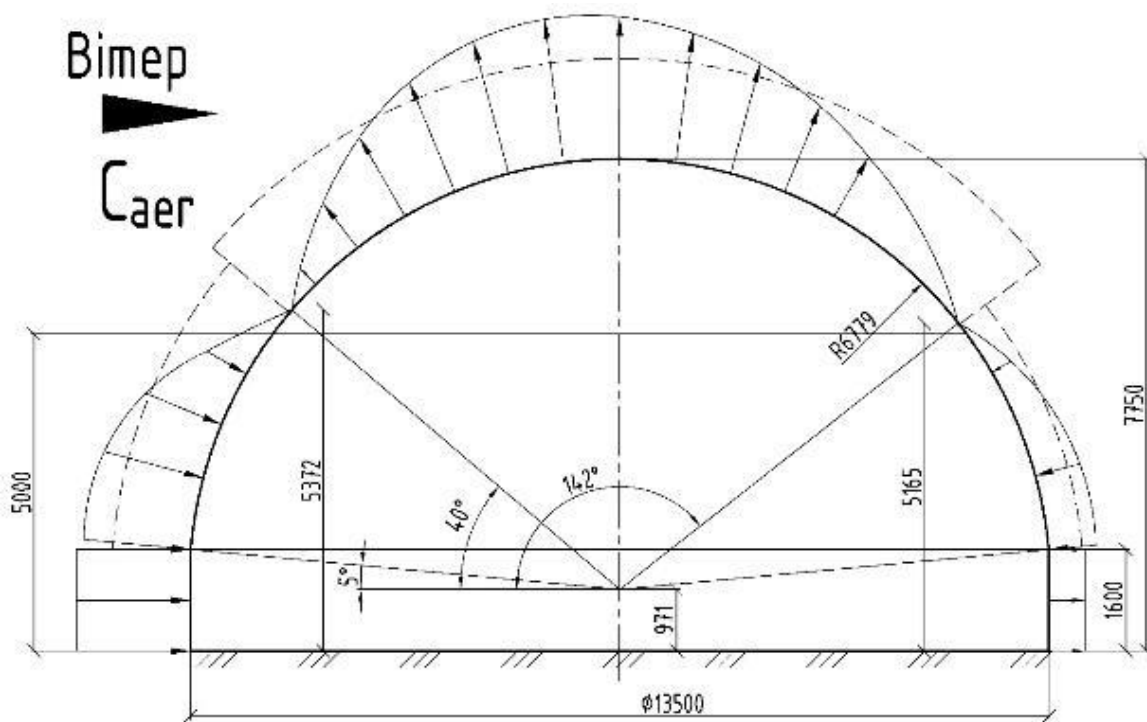


Рисунок 2.2 – Схема, що ілюструє спрощений розподіл аеродинамічних коефіцієнтів по висоті споруди (пунктиром показано спрощену модель).

Виконаємо прикладання вітрових навантажень на тентове покриття. Навантаження на тентове ПВХ-покриття прикладаємо у відповідності до обчислених вітрових тисків (таблиця 2.4). Навантаження (тиск) залежить від відмітки прикладання та азимута по відношенню до головного вектора вітру. За спрощеною моделлю інтенсивність тисків показана у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Розподіл тисків на модель споруди за наближеною моделлю.

Відмітка, $h, м$	Коефіцієнт $C_h$	Тиск на тентове покриття, $W_m'$ , кПа			
		Азимут, $\beta^\circ$			
		0 – 40	40 – 105	105 – 142	142 – 180
0 – 1,6	1,4	+0,313	-0,313	-0,157	-0,157
1,6 – 5,0	1,4	+0,314	-0,403	-0,403	+0,135
5,0 – 5,2	1,42	+0,318	-0,409	-0,409	+0,137
5,2 – 7,75	1,42 – 1,58	-0,409 ...	-0,409 ...	-0,409 ...	-0,409 ...
		-0,455	-0,455	-0,455	-0,455

Завантаження моделі споруди вітровим впливом умовно показана на рис. 2.3

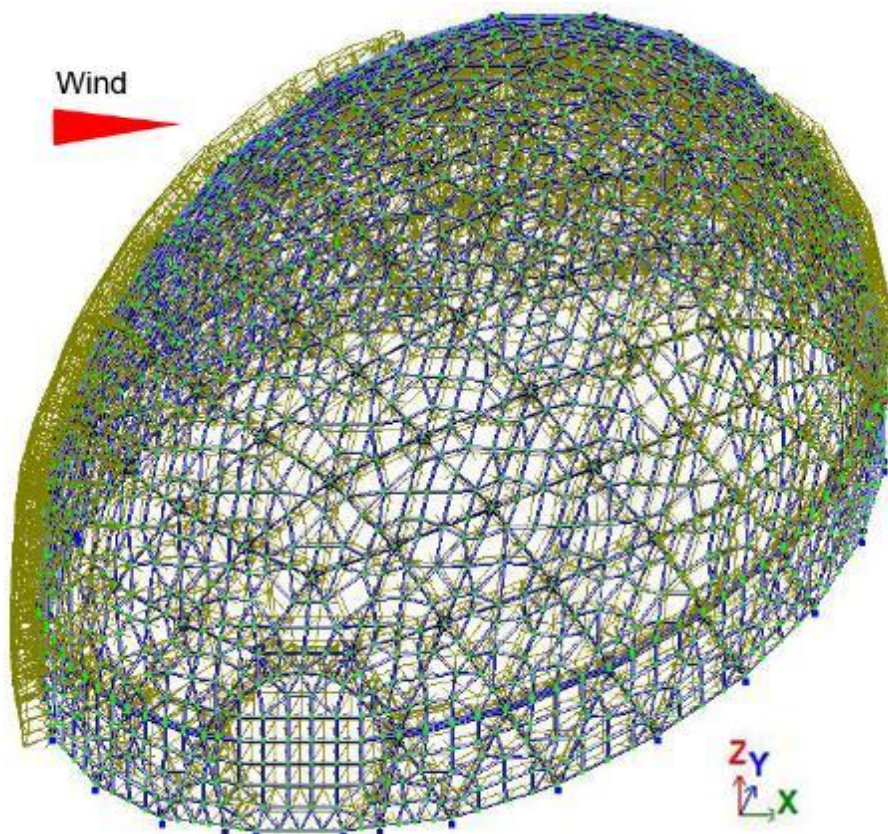


Рисунок 2.3 – 3D-модель споруди під дією вітрового впливу (вздовж 0x), спрощена схема.

Визначимо підйомну силу вітру, що може призвести до перекидання. Загальна вага всіх конструкцій купола з коефіцієнтами запасу, що зменшують стійкість:

$$G' = \gamma_1' \cdot g \cdot (\gamma_{fm1}' \cdot M_{МК} + \gamma_{fm2}' \cdot M_{покр}) = 1,0 \cdot 10 \cdot (2031 \cdot 0,95 + 630 \cdot 0,9) \cdot 10^{-3} = 24,96 \text{ (кН)}$$

Загальна підйомна сила на конструкції купола при розрахунковому вітровому впливі, що обчислена за наближеною методикою:

$$F_{нід,маx} = \sum A_i \cdot W_{mzi} = 31,77 \text{ (кН)}, \text{ що перевищує вагу купола: } G' = 24,96 \text{ (кН)}.$$

$$(F_{нід,маx} = 31,77 \text{ кН}) > (G' = 24,96 \text{ кН}).$$

Умову стійкості від перекидання не виконано! Купол потребує розкріплення анкерними елементами.

При швидкості вітру 20 м/с, що дозволений керівництвом з експлуатації для тентового покриття:

$F_{nid,20} = \sum A_i \cdot W_{m20zi} = 19,5 \text{ (кН)}$ , що менше загальної ваги конструкцій куполу.  $G' = 24,96 \text{ кН}$ .

$$(F_{nid,20} = 19,5 \text{ кН}) < (G' = 24,96 \text{ кН}).$$

Умову стійкості від перекидання виконано. Купол витримує паспортний граничний вітровий вплив на тентове покриття 20 м/с без розкріплення.

Визначимо зсуваючу силу вітру, що може призвести до ковзання. Загальна зсуваюча сила на конструкції куполу при розрахунковому вітровому впливі:

$Q_{зсув,макс} = \sum A_i \cdot W_{mxi} = 18,4 \text{ кН}$ , що більше майже у два рази утримуючої сили  $G' \cdot \mu = 24,96 \cdot 0,4 = 9,98 \text{ (кН)}$ . Тут  $\mu = 0,4$  – коефіцієнт тертя спокою металу опорних конструкцій по рівному піщаному покриттю.

$$(Q_{зсув,макс} = 18,4 \text{ кН}) > (G' \cdot \mu = 9,98 \text{ кН}).$$

Умову стійкості положення (стійкість від ковзання) не виконано! Купол не витримує вплив вітру для 1...3 вітрових районів та зсувається, тому потребує розкріплення анкерними елементами.

Те саме при швидкості вітру 20 м/с, що дозволений керівництвом з експлуатації на тентове покриття:

$Q_{зсув,20} = \sum A_i \cdot W_{m20xi} = 11,33 \text{ (кН)}$ , що менше утримуючої сили  $G' \cdot \mu = 9,98 \text{ кН}$ .

$$(Q_{зсув,20} = 11,33 \text{ кН}) > (G' \cdot \mu = 9,98 \text{ кН}).$$

Умову стійкості положення (стійкість від ковзання) не виконано! Купол не витримує вплив вітру при дії паспортного граничного вітрового впливу

20 м/с на тентове покриття та зсувається, тому потребує розкріплення анкерними елементами.

Визначаємо ожеледні навантаження. Граничне розрахункове значення ваги ожеледних відкладень визначається згідно з ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи», [9, с.33]:

$$G_m = G_e \cdot \gamma_{fm}, \quad (2.3)$$

де  $\gamma_{fm} = 0,562$  – коефіцієнт надійності за граничним значенням ваги ожеледі (приймаємо за терміном експлуатації споруди – 8 років у відповідності з паспортом);  $G_e$  – характеристичне значення ваги ожеледі.

Характеристичне значення розподіленого по довжині ожеледного навантаження для тентового покриття куполу визначається згідно ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи», [9, п.10.6]:

$$G_e = b \cdot k \cdot \mu_2 \cdot \rho \cdot g \text{ [Па]}, \quad (2.4)$$

де  $b$  – товщина стінки ожеледі, мм, що визначається за ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи», [9, табл. 10.1] з урахуванням вимог [9, п.10.7], для 1 ... 3 ожеледних районів товщина стінки ожеледі 12 ... 19 мм;

$k$  – коефіцієнт, який враховує зміну товщини стінки ожеледі по висоті  $h$  і приймається за [ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи», табл. 10.2]. Оскільки споруда невеликої висоти (менше 5 м)  $k = 0,8$ ;

$\mu_2$  – відношення площі поверхні елемента, що піддається обледенінню, до повної площі поверхні елемента. При відсутності даних спостережень допускається приймати  $\mu_2 = 0,6$ .

$\rho$  – густина льоду, яка приймається  $0,9 \text{ г/см}^3$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ .

$$G_m = \gamma_{fm} \cdot b \cdot k \cdot \mu_2 \cdot \rho \cdot g = 0,562 \cdot 19 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,9 \cdot 10^3 \cdot 10 = 46,13 \text{ (Па)}.$$

Експлуатаційний ожеледний вплив:

$$G_e = 0,8 \cdot G_m = 0,8 \cdot 46,13 = 36,9 \text{ (Па)}.$$

Оскільки металокаркас захищений двобічним покриттям від ожеледних відкладень, утворенням крижаної кірки на сталевих елементах нехтуємо. Ожеледні відкладення можливі на поверхні тенту за умови відсутності його прогріву з середини приміщення.

Ожеледний вплив збираємо у вузли конструкції куполу у відповідності до їх загальних вантажних площ. Середню вантажну площу одного вузла легко визначити як загальна площа поверхні тентового покриття  $\sum A = 330 \text{ м}^2$  розділити на кількість вузлів, без урахування опорних,  $n_i$ :

$$A_{i, \text{сеп}} = \frac{\sum A}{n_i} = \frac{330}{101} = 3,3 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Розрахункове зосереджене навантаження на один вузол від ожеледі:

$$F_{i, \text{сеп}} = G_m \cdot A_{i, \text{сеп}} = 46,13 \cdot 3,3 \cdot 10^{-3} = 0,153 \text{ (кН)}.$$

Розрахуємо вітрове навантаження при ожеледі. Граничне розрахункове значення нормального тиску вітру на покритті ожеледдю елементи визначається згідно ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи», [9, п.10.8]:

$$W_q = W_B \cdot \gamma_{fw} \text{ [кН/м}^2\text{]}, \quad (2.5)$$

де  $\gamma_{fw} = 0,55$  – коефіцієнт надійності за граничним значенням нормального тиску вітру на покритті ожеледдю елементи, що визначається згідно з ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи», [9, п.10.11]. за терміном експлуатації споруди – 8 років у відповідності з паспортом на геодезичний купол.

Для 1...3 вітрових районів при ожеледі  $W_0 = 0,15...0,25 \text{ кПа}$ .

Збираємо снігові навантаження. Нормативна вага снігового покриття на  $1 \text{ м}^2$  згідно з розділом 8 ДБН В.1.2-2:2006 для 1 ... 4-го району за сніговим тиском  $S_0 = 0,8...1,4 \text{ кПа}$ . Граничне розрахункове значення снігових впливів на тентове ПВХ-покриття куполу розраховуємо згідно з формулою (2.6):

$$S_m = \gamma_{fm} \cdot S_0 \cdot C \text{ [кПа]}, \quad (2.6)$$

де  $\gamma_{fm} = 0,64$  (приймаємо за [9, с.23] лінійною інтерполяцією за терміном експлуатації куполу – 8 років).

Експлуатаційне значення:

$$S_e = \gamma_{fe} \cdot S_0 \cdot C, \text{ [кПа]}, \quad (2.7)$$

де  $\gamma_{fe} = 0,28$  (приймаємо за табл. 8.3 ДБН В.1.2-2:2006, с.24 для 5% проміжку часу, коли можуть порушуватися умови за 2 групою граничних станів).

Згідно з додатком Ж [9, с.55 – 56] застосована схема снігового впливу – за варіантом 1 (див. рис. 2.4).

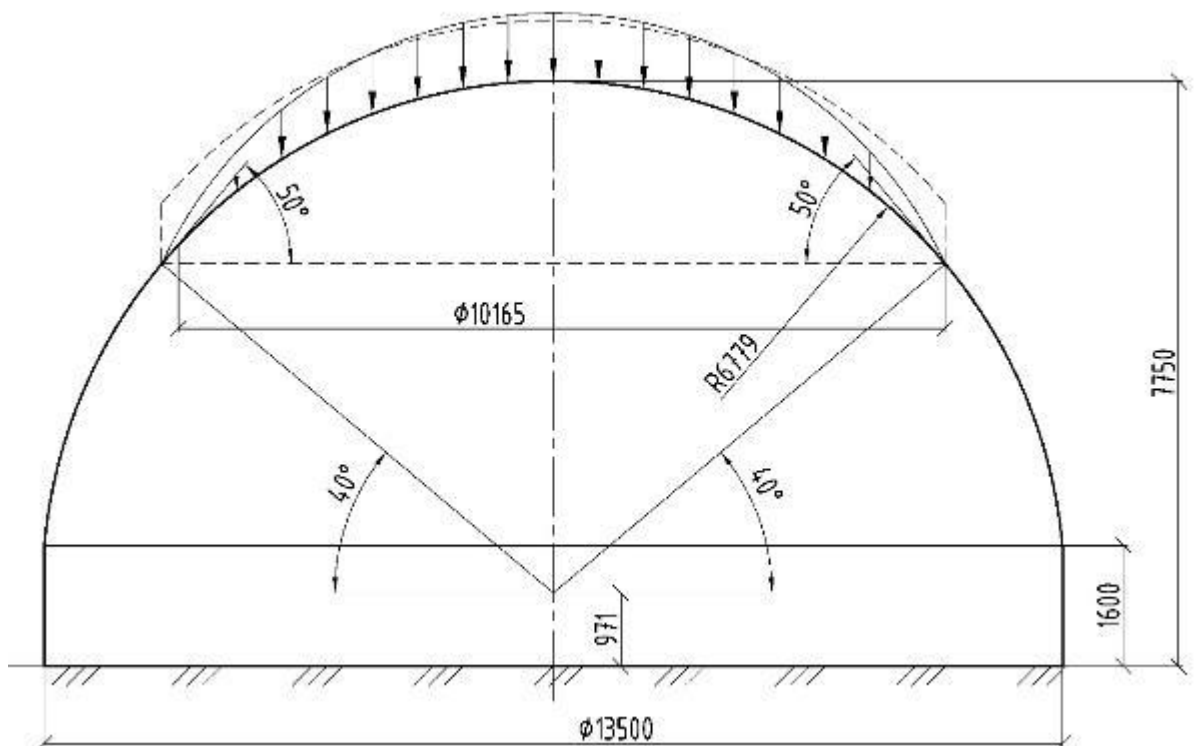


Рисунок 2.4 – Схема прикладання снігового впливу на купол згідно з ДБН В.1.2-2:2006. Пунктиром показаний спрощений варіант.

Згідно з технічним завданням покрівля куполу не експлуатована, тобто  $C_e = 1$ . Коефіцієнт географічної висоти  $C_{alt} = 1$ . Для верхівки сферичної оболонки покрівлі куполу  $C_n = C_e \cdot C_{alt} \cdot \mu_n = 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1$ . На інших ділянках  $\mu_n = \cos(1,8 \cdot \alpha)$ . Розрахунковий сніговий вплив в коньку.  $S_{mn} = \gamma_{fm} \cdot S_0 \cdot C = 0,64 \cdot 1,4 \cdot 1 = 0,896$  (кПа). Для інших ділянок:  $S_{mn}(\alpha) = \gamma_{fm} \cdot S_0 \cdot C = 0,896 \cdot \cos(1,8 \cdot \alpha)$  (кПа). При  $\alpha = 50^\circ$ :  $S_{mn}(\alpha) = \gamma_{fm} \cdot S_0 \cdot C = 0,896 \cdot \cos(1,8 \cdot 50^\circ) = 0,896 \cdot \cos(90^\circ) = 0$ . Для спрощеної схеми навантаження (показано пунктиром)  $S_{mn}'(\alpha = 0 \dots 50^\circ) = 0,8$  (кПа). Експлуатаційне значення  $S_e'(\alpha = 0 \dots 50^\circ) = 0,351$  (кПа).

Снігові навантаження на купол збираємо у вузли у відповідності до проективної схеми. Навантаження на вузол пропорційне вантажній площі кожного з вузлів (рис. 2.5).

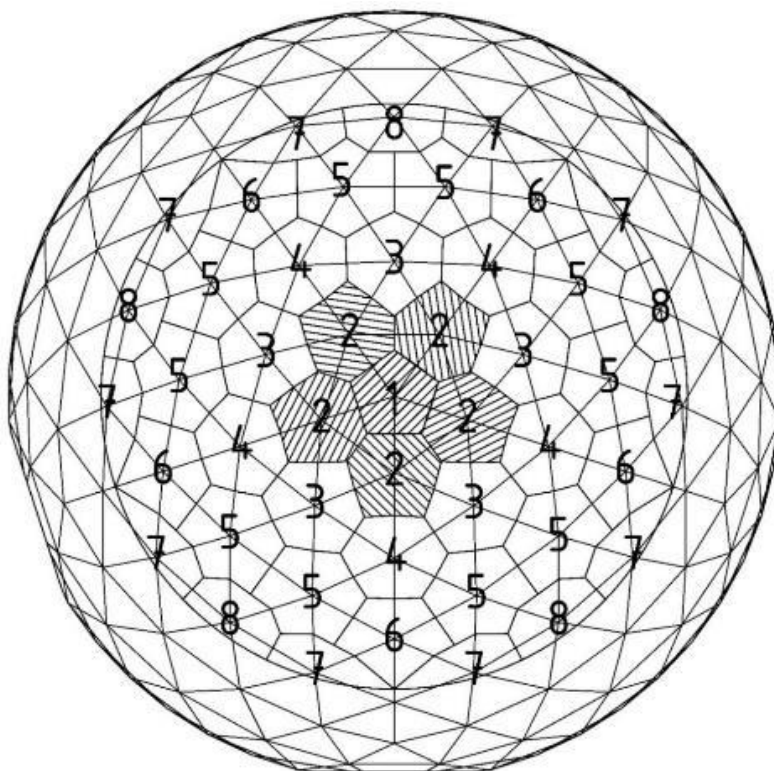


Рисунок 2.5. – Схема вантажних площ  $A_i$  силових вузлів конструкції (вид згори) для розрахунку впливу снігу.

На вузли поза зовнішнім контуром проективного кола діаметром 10,165 м снігове навантаження не впливає.

Числові значення снігових впливів зведені у табл. 2.6 та на рис. 2.6.

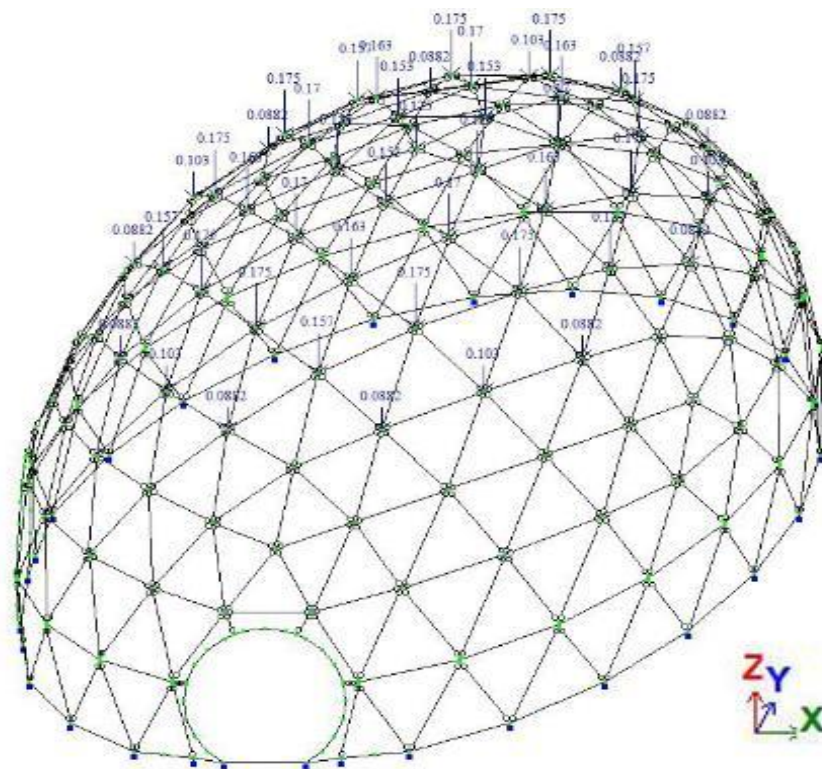


Рисунок 2.6. - Розрахункова модель під дією снігових впливів.



Таблиця 2.6 – Розрахункове навантаження від снігу у вузлах за типом вантажних площ.

№ багатокутника $i$	Проективна площа $A_i, \text{м}^2$	Кутова координата вузла $\alpha$ , град	$\cos(1,8 \cdot \alpha)$	Дійсна модель		Спрощена модель
				$S_{mn}$ , кН/м <sup>2</sup>	$F_s = S_{mn} \cdot A_i$ , кН	$F_{sn} = S_{mn}' \cdot A_i$ , кН
1	1,561	0	1	0,896	1,399	1,249
2	1,917	11	0,941	0,843	1,616	1,534
3	2,122	20	0,809	0,725	1,538	1,698
4	2,038	25	0,707	0,633	1,290	1,630
5	2,192	34	0,482	0,432	0,947	1,753
6	1,967	39	0,274	0,245	0,483	1,574
7	1,102	47	0,1	0,090	0,108	0,882
8	1,290	47	0,1	0,090	0,117	1,032

## 2.3 Моделювання напружено-деформованого стану куполу

### 2.3.1 Теорія роботи стрижневого каркасного куполу під навантаженням

Геодезичний купол, прийнятий за основу реальної споруди є класичним каркасно-стрижневим куполом з тентовим покриттям та внутрішнім екраном. Методика розрахунку куполу полягає у визначенні внутрішніх зусиль у стрижневих елементах та перевірці їх міцності, визначення зусиль у кріпильних між елементних вузлах та перевірка їх міцності, визначенні запасу стійкості форми, рівноваги, положення; визначенні деформацій споруди та порівнянні їх з допустимими нормативними значеннями. З огляду на шарнірний спосіб з'єднання більшості елементів у вузлах у вигляді геометрично незмінюваних фігур-трикутників, у стрижневих елементах будуть переважати зусилля розтягу-стиску. Згинальні моменти можуть з'являтися виключно у елементах опорного та формоутворюючого кілець, а також, у елементах дверних рам.

Внутрішні зусилля у стрижневих елементах залежать від виду навантаження – осе симетричної (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, тому комбінація тимчасових впливів вітру + сніг не розглядається. Легкі геодезичні стрижневі куполи, обшиті тентовим покриттям, необхідно перевіряти розрахунком на дію підйомної сили вітру (стійкість положення, стійкість від перекидання). На попередньому етапі було доведено, що при вітрових впливах характерних для 3 вітрового району, стійкість положення та стійкість від перекидання без додаткових анкерувань до основи, або, привантажень баластом основи куполу, не забезпечуються. Тому у подальшому розглядаємо варіант моделі, що в точках дотику до поверхні кріпиться до ґрунтової основи.

### 2.3.2 Опис розробленої тривимірної моделі куполу

Розрахунок тривимірної комп'ютерної моделі купола 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 згідно з рекомендаціями [13,14] 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 куполу, змодельовані у вигляді корисного постійного навантаження.

Товщина пластинчастих скінчених елементів поверхні ПВХ-покриття купола прийнята у відповідності до проектних рішень – 0,5 мм. Густина ПВХ-покриття  $\rho_{нк} = 1,7 \text{ т} / \text{м}^3$ . Відповідно, нормативна вага 1  $\text{м}^2$  оболонки –  $m_1 = 0,0005 \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot 1,7 \text{ т} / \text{м}^3 = 0,00085 \text{ т} / \text{м}^2 = 0,85 \text{ кг} / \text{м}^2$ .

Власна вага стрижневих елементів купола прикладена програмою автоматично з урахуванням гравітаційного коефіцієнта  $K_g = 1,45$ .

Міцнісні та жорсткісні характеристики пластинчастих елементів покриття моделі. Купола D13.5. Згідно з рекомендаціями науково-методичної літератури доцільно знижувати загальний модуль пружності матеріалу ПВХ-покриття. Тому, у розрахунках, розрахунковий короткочасний модуль пружності пластинчастих елементів покриття купола  $E_k = 0,7 \cdot E_{ПВХ} = 0,7 \cdot 2700 \cdot 10^6 = 1890 \text{ (МПа)} = 1,89 \cdot 10^5 \text{ (м / м}^2\text{)}$ . Коефіцієнт Пуассона для всіх пластинчастих ПВХ-елементів залишаємо без змін  $\nu = 0,4$ . Крок дискретизації пластинчастої моделі  $\approx 400$  мм. Товщина пластинчастих елементів – 0,5 мм.

Стрижнева модель металокаркасу. З'єднання стрижнів у вузлах – шарнірне (шарнірна модель добре описує одноболтове приєднання), окрім елементів формуючого кільця, з'єднання між елементами якого – жорстке (жорстка модель стику добре описує конструктивне приєднання на кутових з'єднувачах і болтах). Перерізи прийняті у відповідності до даних таблиці 2.1.

Типові стрижневі елементи – стрижні трубчастим перерізом 42 (D) x 3 (t) мм.

Елементи опорного кільця – стрижні трубчастим перерізом 42 (D) x 3 (t) мм.

Елементи розкосів циліндричної частини – стрижні трубчастим перерізом 42 (D) x 3 (t) мм.

Елементи кілець дверних рам – стрижні трубчастим перерізом 50 (D) x 2 (t) мм.

Елементи формуючого кільця – стрижні у вигляді квадратного гнutoзваного профілю перерізом 50 (H) x 50 (B) x 3 (t) мм.

Розрахунковий модуль пружності стрижневих елементів зі Сталі 20 та С245  $E_{cm} = 206 \text{ ГПа} = 2,06 \cdot 10^7 \text{ (м / м}^2\text{)}$ , густина Сталі 20 та С245  $\rho_{cm} = 7,85 \text{ т / м}^3$ , коефіцієнт Пуассона  $\nu_{cm} = 0,3$  згідно з [11, табл. Б.1, с. 127].

Вигляд тривимірної скінчено-елементної моделі купола, відповідно, без тентового покриття та з покриттям, наведено на рис. 2.8 та рис. 2.9. Перевірка несучої здатності і стійкості конструкцій виконана відповідно до діючих нормативних документів [8] ... [12].

Розрахунку підлягали варіанти моделей із різним способом кріплення.

Варіант моделі 1 (адекватно відображає роботу конструкції у варіанті привантаження всіх опорних точок баластом невеликої ваги та роботу опорних конструкцій від зміщення тільки силами тертя) – кріплення у всіх опорних точках, що допускають незначне зміщення по осям  $0x$ ,  $0y$  (у горизонтальній площині) та заборона переміщення по  $0z$ .

Варіант моделі 2 (адекватно відображає роботу конструкції у варіанті привантаження п'яти опорних точок баластом великої ваги) – кріплення у 5 полярно симетричних точках (привантаження баластом, заборона переміщень по  $0x$ ,  $0y$ ,  $0z$ ), у всіх інших опорних точках – опорні п'ятки, що передають тиск на ґрунт основи (однобічна заборона переміщення переміщення по  $0z$ ), рис. 2.7.

Варіант моделі 3 (адекватно відображає роботу конструкції у варіанті кріплення до стаціонарних фундаментів, або до жорсткої платформи) – кріплення у всіх опорних точках від переміщення по осям  $0x$ ,  $0y$ ,  $0z$ .

Всі три моделі перевірялися на дію тимчасових впливів у відповідності до таблиці 3 розрахункових комбінацій навантажень. Докладно проаналізовано два найгірших варіанти:

Варіант 1 (комбінація 2) – власна Куполу + вітровий вплив (27 м/с або, для тента, 20 м/с).

Варіант 2 (комбінація 5) – власна Куполу + ожеледь + сніг.

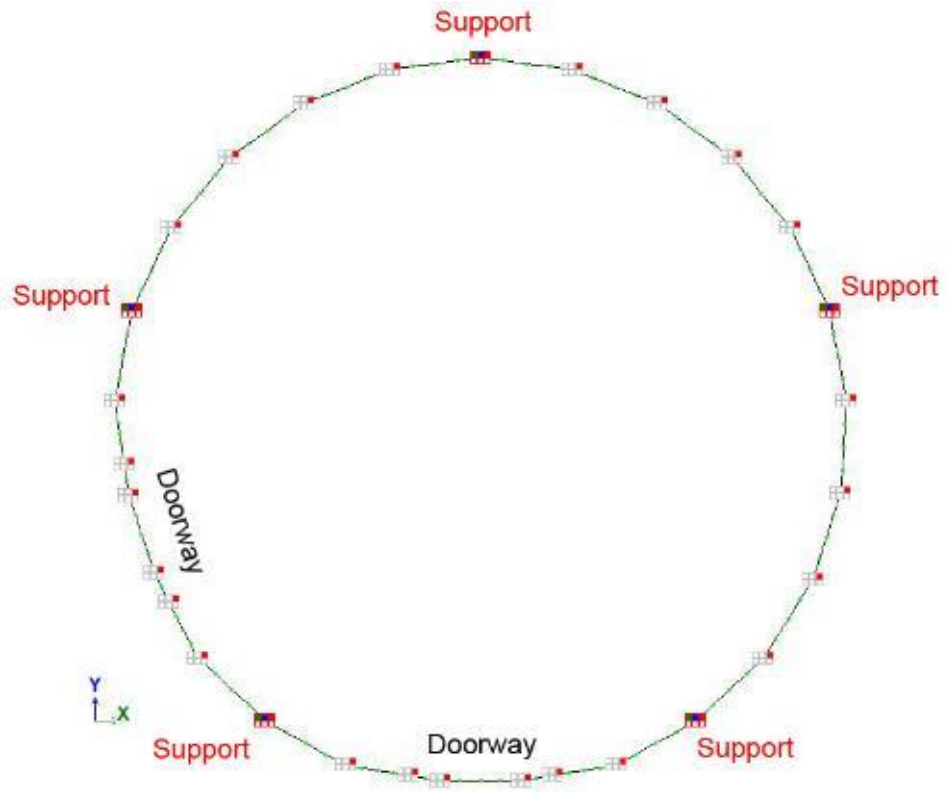
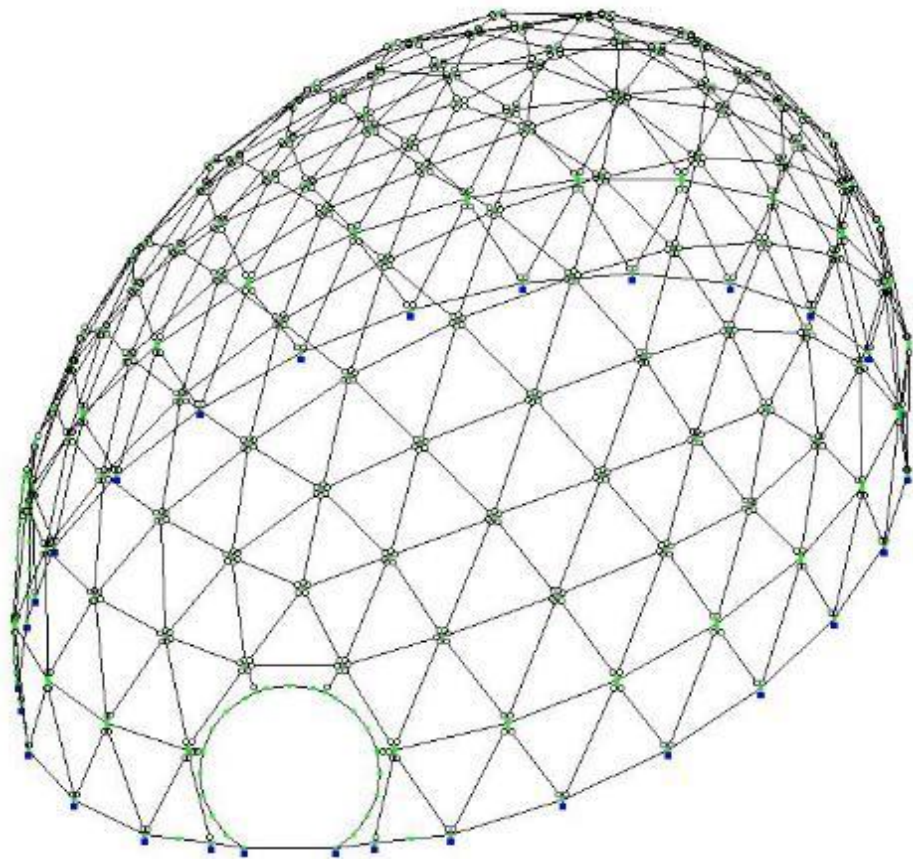
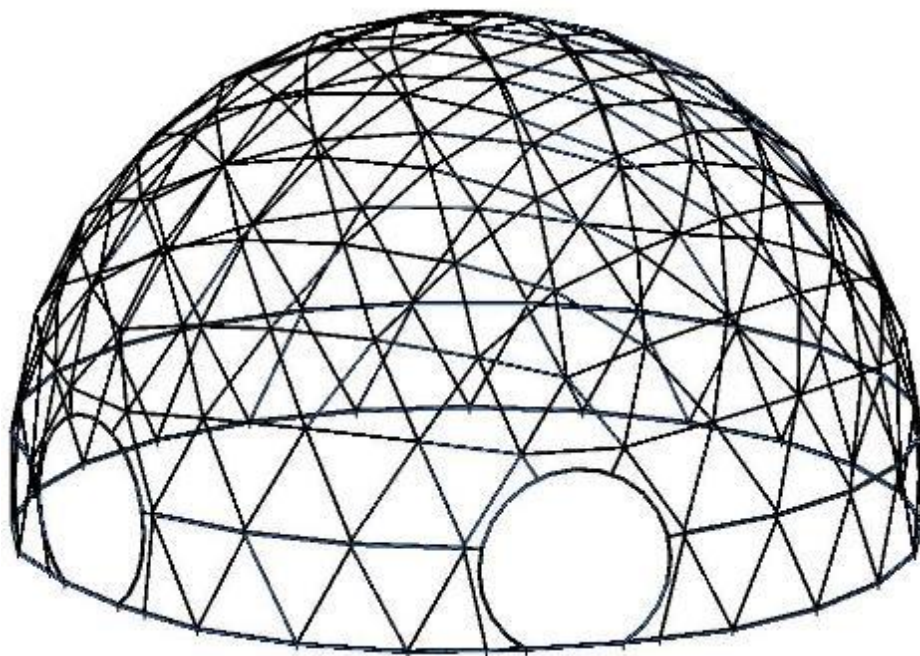


Рисунок 2.7. - Схема варіанту моделі з привантаження п'яти точок баластом.

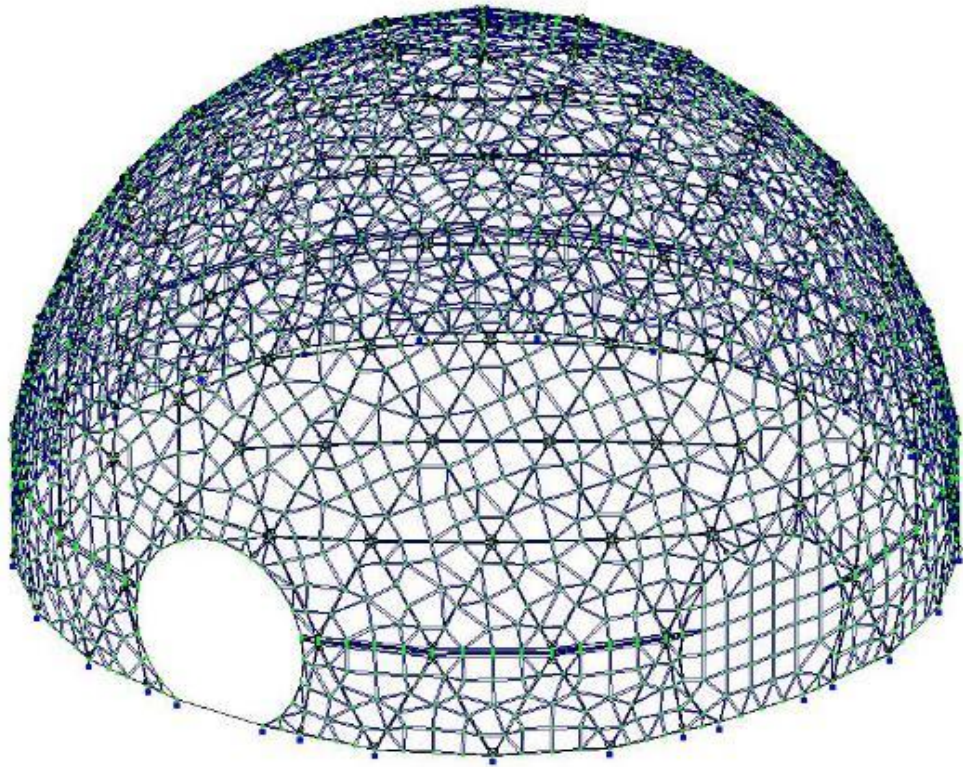


а)

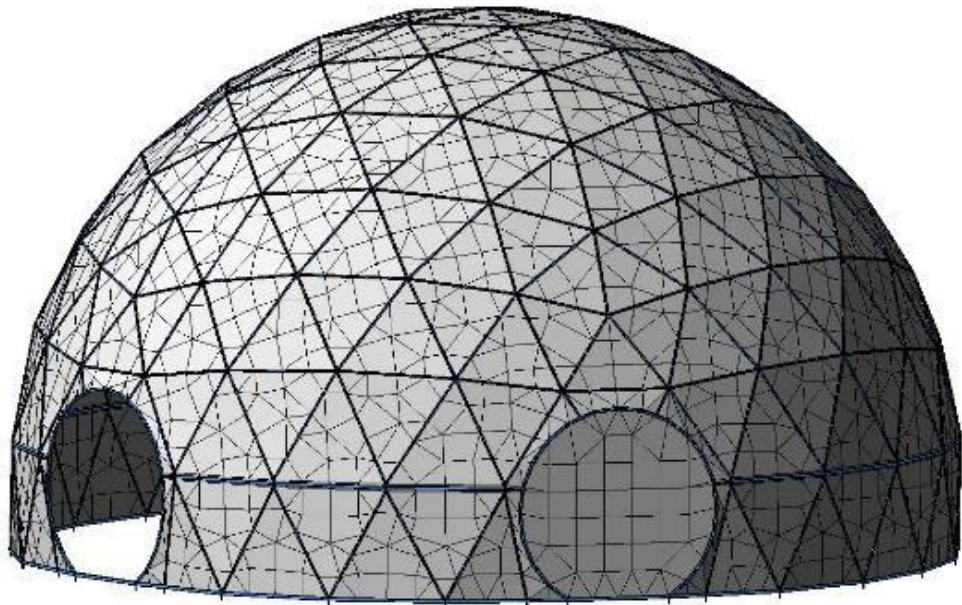


б)

Рисунок 2.8. - Тривимірний розрахунковий модель геодезичного купола D13.5 (тент умовно не показаний): а – скінченно елементна модель, б – її тривимірне відображення.



а)



б)

Рисунок 2.9 - Тривимірні розрахункові моделі геодезичного купола (з тентовим покриттям, один дверний проріз, для наочності, відчинений):

а – скінчено елементна модель, б – її тривимірне відображення.

### 2.3.3 Результати розрахунку куполу на впливи згідно з ДБН В.1.2-2:2006

Проведемо розрахунок за комбінацією №5 (власна вага + сніг + ожеледь). Починаємо з розрахунку за 1 групою граничних станів.

За результатами скінчено елементного моделювання отримано значення внутрішніх зусиль у стрижневих елементах каркасу від розрахункових впливів по комбінації №5 (власна вага + розрахунковий сніг + ожеледь), визначених згідно з ДБН В.1.2-2:2006 (рис. 2.10 ... рис. 2.12).

Модель 1:

З рис. 2.10 та 2.11 добре видно, що у опорному кільці виникають максимальні зусилля розтягу, які складають  $N_{\kappa, \max 1} = +0,225 \text{ т} = +2,25 \text{ кН}$ . Максимальні стискаючі зусилля  $N_{\kappa, \min 1} = -0,063 \text{ т} = -0,63 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  $M_{\kappa, \max 1} = +0,00414 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,0414 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

У формоутворюючому кільці виникають максимальні зусилля розтягу, які складають  $N_{\phi, \max 1} = +0,003 \text{ т} = +0,03 \text{ кН}$ . Максимальні стискаючі зусилля  $N_{\phi, \min 1} = -0,003 \text{ т} = -0,03 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  $M_{\phi, \max 1} = +0,0145 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,145 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

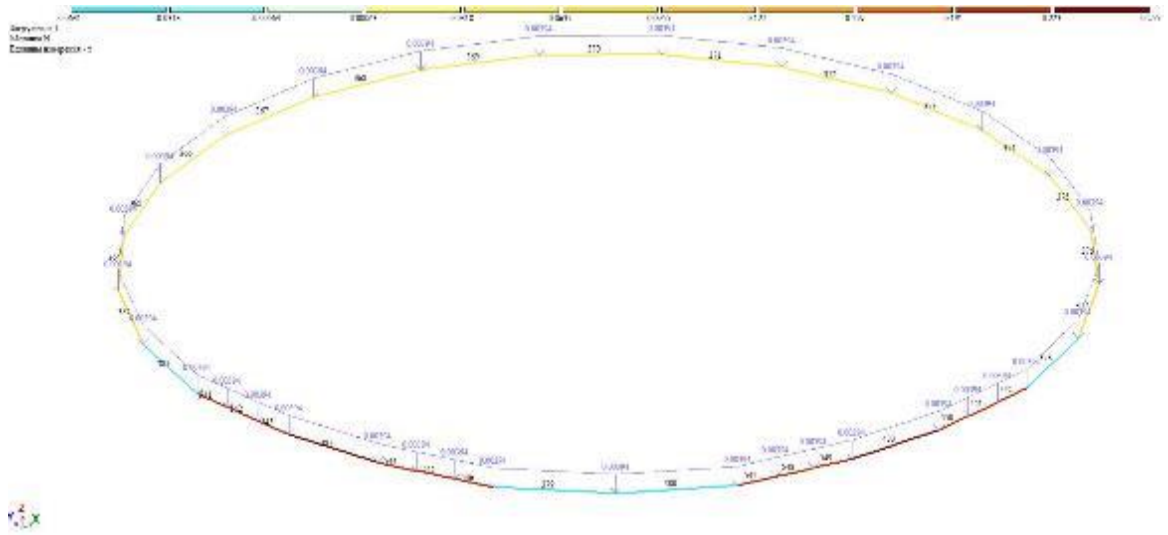
Модель 2:

У опорному кільці виникають максимальні зусилля розтягу, які складають  $N_{\kappa, \max 2} = +0,225 \text{ т} = +2,25 \text{ кН}$ . Максимальні стискаючі зусилля  $N_{\kappa, \min 2} = -0,229 \text{ т} = -2,29 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  $M_{\kappa, \max 2} = -0,0061 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,061 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

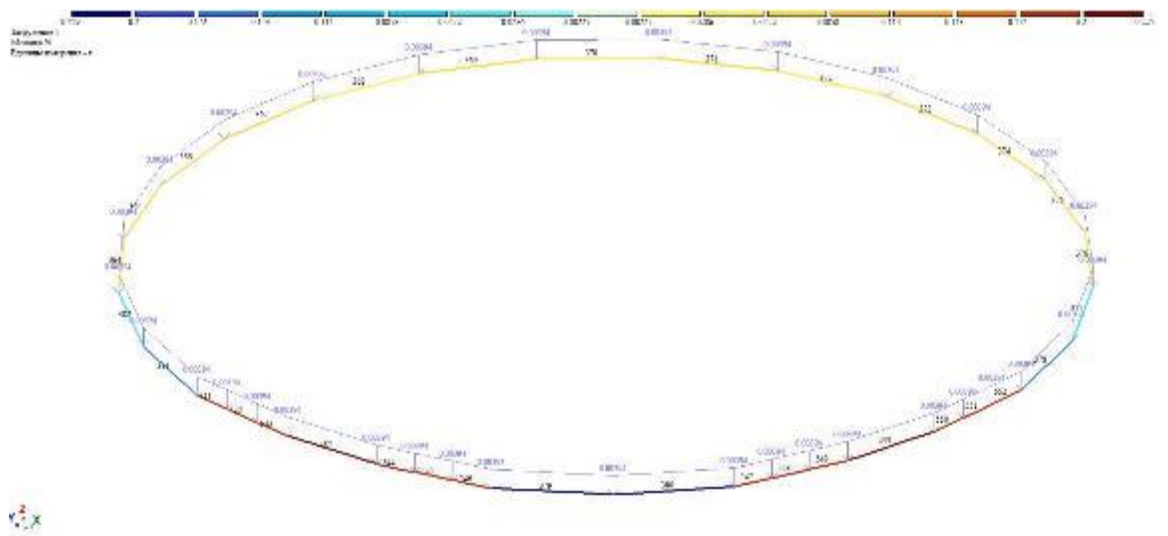
У формоутворюючому кільці виникають тільки зусилля розтягу, максимальне значення яких складає  $N_{\phi, \max 2} = +0,752 \text{ т} = +7,52 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  $M_{\phi, \max 2} = +0,016 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,16 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

Модель 3:

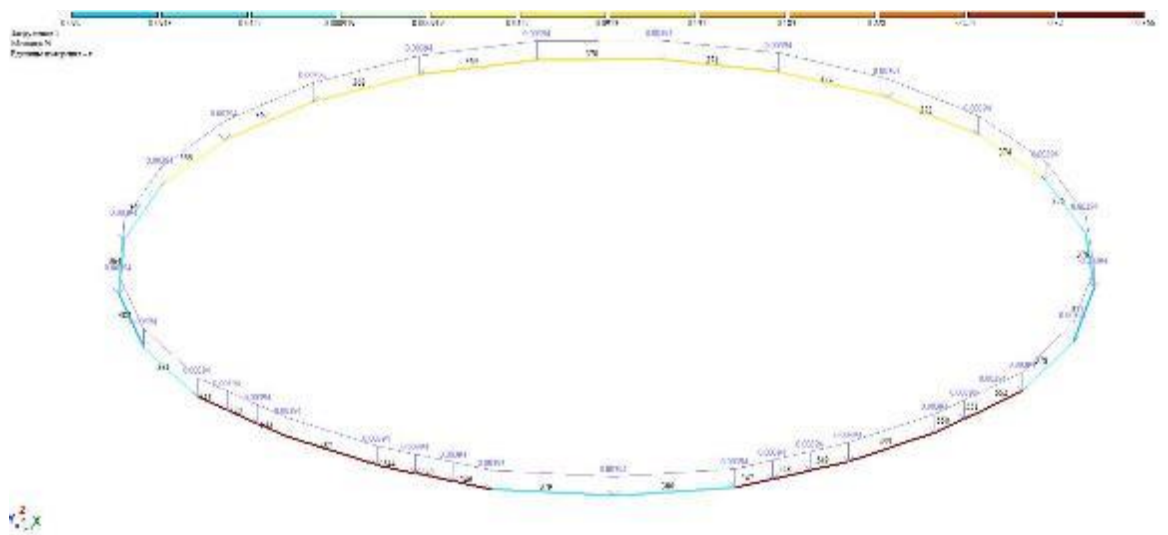




а)

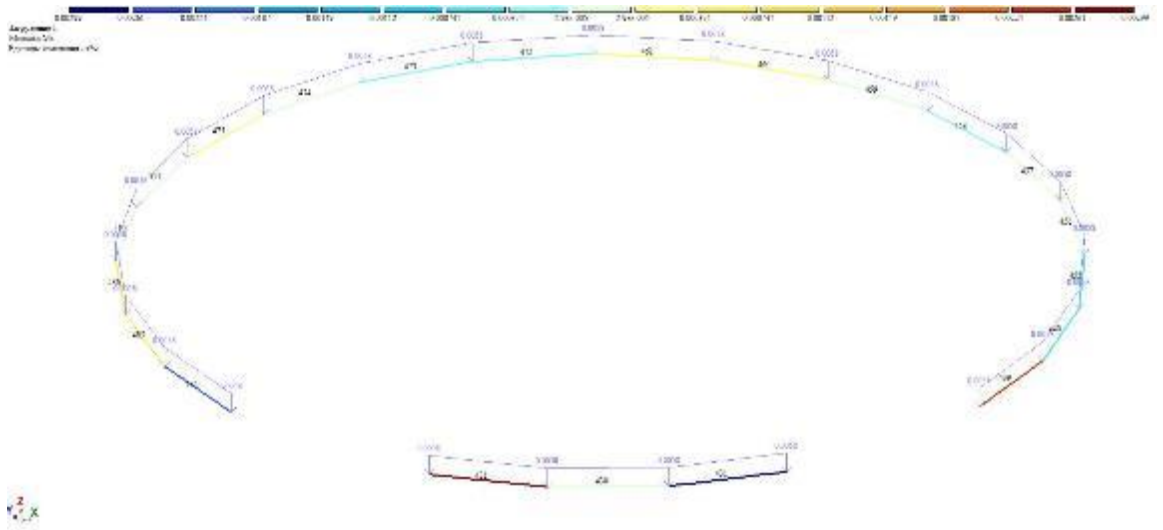


б)

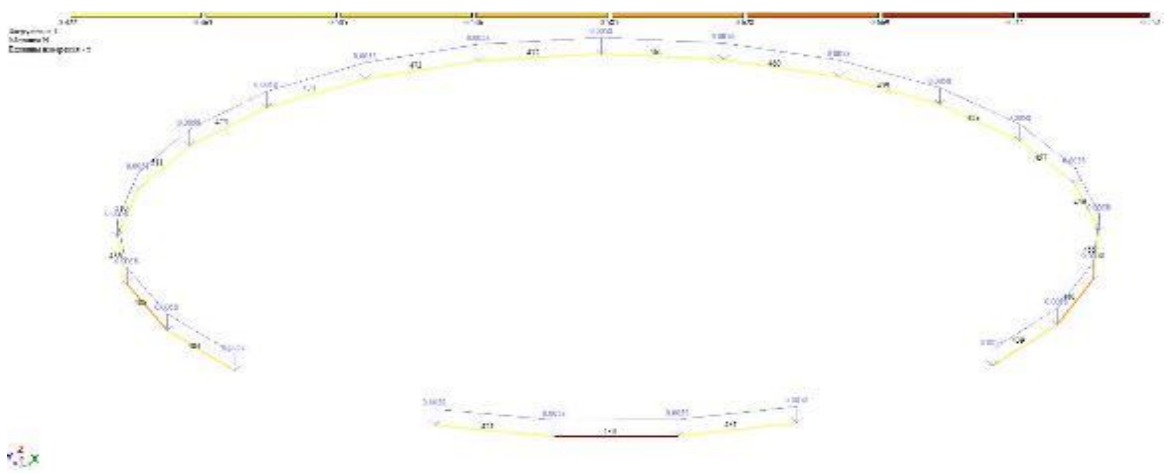


в)

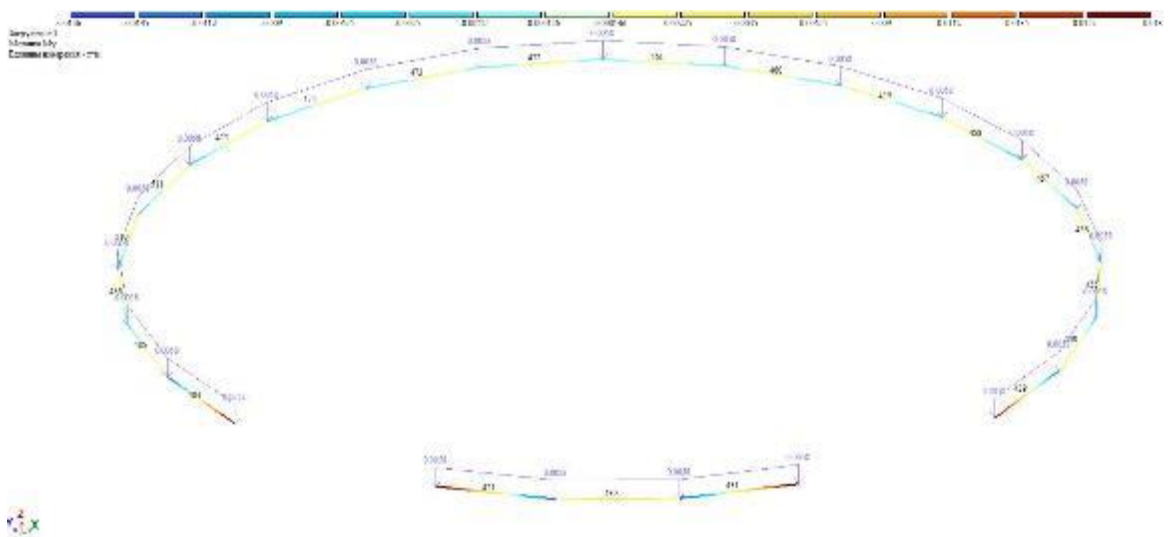
Рисунок 2.10 - Розподіл осьових зусиль  $N$ , [Т], у опорному кільці від навантажень за комбінацією №5 (власна вага + сніг + ожеледь): а – модель 1, б – модель 2, в – модель 3.



а)



б)



в)

Рисунок 2.11 – Розподіл осевих зусиль  $N$ , [Т], формуючому кільці від навантажень за комбінацією №5 (власна вага + сніг + ожеледь): а – модель 1, б – модель 2, в – модель 3.

У опорному кільці виникають максимальні зусилля розтягу, які складають  
 $N_{к,макс3} = +0,366 \text{ т} = +3,66 \text{ кН}$ . Максимальні стискаючі зусилля  
 $N_{к,мін3} = -0,092 \text{ т} = -0,92 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  
 $M_{к,макс3} = +0,007 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,070 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

У формоутворюючому кільці виникає тільки розтяг. Максимальні зусилля розтягу  
 $N_{ф,макс3} = +0,755 \text{ т} = +7,55 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  
 $M_{ф,макс3} = +0,018 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,18 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

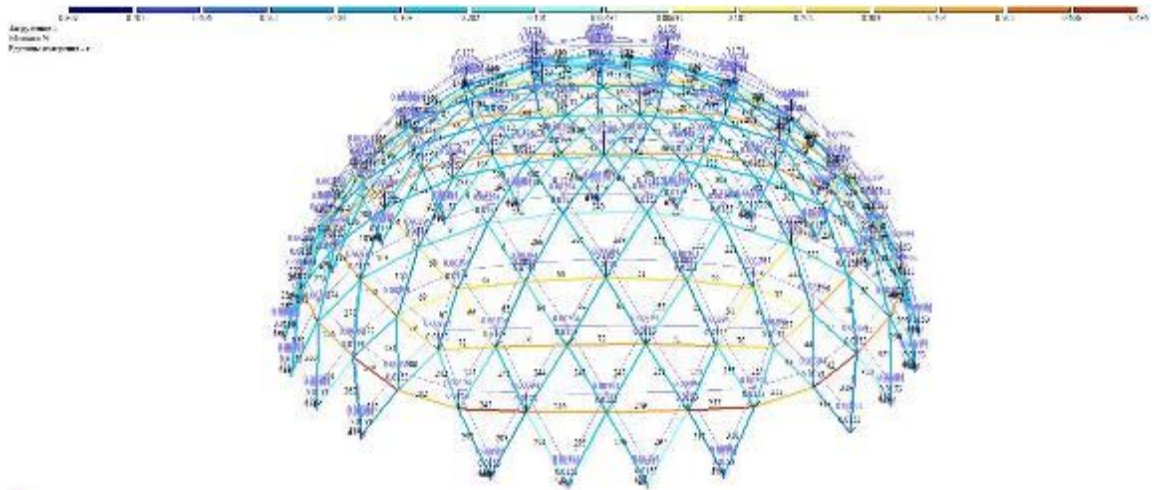
Для елементів опорного та формоутворюючого кілець. Зусилля як в опорному, так і у формоутворюючому кільцях при комбінації навантажень №5 для варіантів моделей 1, 2 та 3 менші, аніж зусилля при комбінації №2 (вітрові впливи). Розрахунок не потрібний.

Для типових елементів каркасу. Внутрішні силові фактори у типових елементах складаються, в основному, з осьових сил розтягу-стиску (табл. 2.6). Розрахунком встановлено, що величина згинальних моментів у всіх елементах при всіх варіантах завантаження сніговим і ожеледним тимчасовими впливами не перевищує величини, що на три порядки менше величини осьової сили. Впливом моменту можна знехтувати.

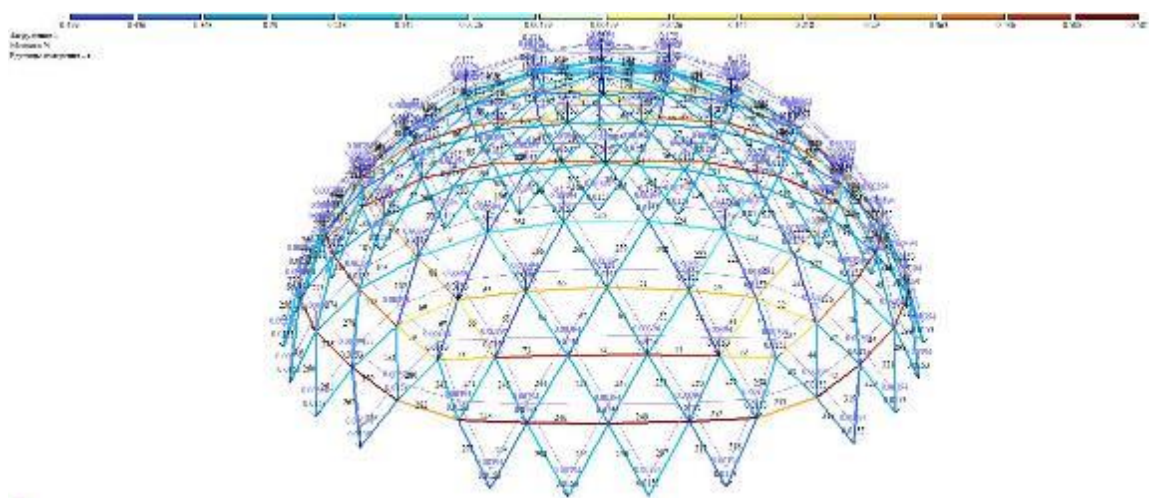
Переріз типових елементів – труба 42 x 3 мм зі Сталі 20; площа перерізу  
 $A = 3,676 \text{ см}^2$ ; площа нетто з урахуванням послаблення отвором діаметром 17 мм для болта М14  
 $A_n = A - 2 \cdot t \cdot d_o = 3,676 - 2 \cdot 0,3 \cdot 1,7 = 2,656 \text{ см}^2$ . Радіус інерції  $i = 1,383 \text{ см}$ .

Таблиця 2.6 – Визначення внутрішніх зусиль і коефіцієнтів використання у типових стрижневих елементах каркасу при сніговому і ожеледному впливі

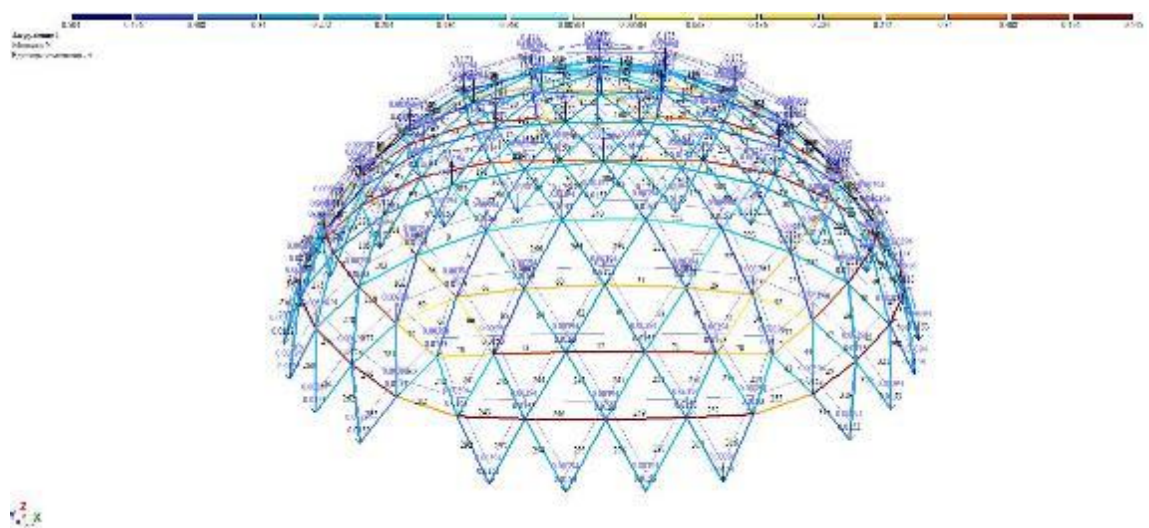
№ елемента	Номер моделі	Значення осьового зусилля $N, кН$	Розрахункова довжина $l = \mu \cdot l_{ef}, м$	Сталь	Несуча здатність, $N_u, кН$	Коефіцієнт надійності $K$	Коефіцієнт використання, $\alpha$
Модель 1 (привантаження невеликим баластом кожної опорної точки, можливість незначних горизонтальних зміщень)							
42	1	+6,35	1,520	Сталь 20	+59,76	1,1	0,117
279	1	+6,35	1,520		+59,76	1,1	0,117
262	1	-4,94	1,660		-39,95	1,1	0,137
319	1	-4,95	1,659		-40,00	1,1	0,137
Модель 2 (привантаження великим баластом 5 точок, не можливість їх зміщень по горизонталі, інші опорні точки працюють тільки на стиск)							
42	2	+5,81	1,520	Сталь 20	+59,76	1,1	0,108
252	2	+5,81	1,521		+59,76	1,1	0,108
113	2	-4,74	1,52		-46,75	1,1	0,111
226	2	-4,74	1,52		-46,75	1,1	0,111
Модель 3 (анкерування всіх опорних точок до стаціонарної платформи, робота в'язей від зміщення по всім трьом осям)							
243	3	+5,44	1,521	Сталь 20	+59,76	1,1	0,10
252	3	+5,43	1,521		+59,76	1,1	0,10
113	3	-4,99	1,52		-46,75	1,1	0,118
226	3	-4,99	1,52		-46,75	1,1	0,118



а)



б)



в)

Рисунок 2.12 – Розподіл осьових зусиль,  $N$ , [Т], у типових елементах Куполу у від навантажень за комбінацією №5 (власна вага + сніг + ожеледь): а – модель 1, б – модель 2, в – модель 3.

В табл. 2.7 несуча здатність при розтязі, з урахуванням послаблення наскрізним отвором, обчислена за формулою:

$$N_{u,\max} = A_n \cdot R_y \cdot \gamma_c = 2,656 \cdot 10^{-4} \cdot 225 \cdot 10^6 \cdot 1,0 = 59,76 \text{ (кН)}.$$

Несуча здатність при стиску:

$$N_{u,\min} = -\varphi \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_c = -3,676 \cdot 10^{-4} \cdot 225 \cdot 10^6 \cdot 1,0 \cdot \varphi = -82,71 \cdot \varphi \text{ (кН)}.$$

З табл. 2.6 добре видно, що коефіцієнт використання типових навантажених елементів моделі не перевищує 1. Умову міцності та стійкості виконано.

Виконуємо розрахунок опорних підкосів в циліндричній частині при комбінації №5.

Зусилля у опорних підкосах циліндричної частини каркасу куполу, що виконані з круглих труб діаметром 42 мм та товщиною стінки 3 мм зі Сталі 20, площа перерізу яких  $A = 3,676 \text{ см}^2$ ; площа нетто з урахуванням послаблення отвором діаметром 17 мм для болта М14  $A_n = A - 2 \cdot t \cdot d_o = 3,676 - 2 \cdot 0,3 \cdot 1,7 = 2,656 \text{ см}^2$ ; радіус інерції  $i = 1,383 \text{ см}$ , зведені до таблиці 2.7. Аналіз моделей доводить, що у підкосах виникають тільки зусилля стиску.

З табл. 2.7 добре видно, що коефіцієнт використання підкосів не перевищує 1. Умову міцності та стійкості підкосів виконано.

Виконуємо розрахунок за 2 групою граничних станів. Розрахунки за другою групою граничних станів виконані у запас від розрахункових впливів, зібраних згідно з ДБН В.1.2-2:2006 за комбінацією №5 (власна вага + сніг та ожеледь). Загальний вигляд вихідного та деформованого куполу для найгіршого з точки зору деформацій варіанту (модель 1) показані на рис. 2.13.

Таблиця 2.7 – Визначення внутрішніх зусиль і коефіцієнтів використання у підкосах

№ елемент а	Номер моделі	Осьове зусилля $N, кН$	Розрахункова довжина $l = \mu \cdot l_{ef}, м$	Сталь	Несуча здатність по стійкості, $N_{ub}, кН$	Коефіцієнт надійності К	Коефіцієнт використання, $\alpha$
Модель 1 (привантаження невеликим баластом кожної опорної точки, можливість незначних горизонтальних зміщень)							
322	1	-9,47	1,763	20	-35,42	1,1	0,294
Модель 2 (привантаження великим баластом 5 точок, не можливість їх зміщень по горизонталі, інші опорні точки працюють тільки на стиск)							
357	2	-8,33	1,764	20	-35,38	1,1	0,259
Модель 3 (анкерування всіх опорних точок до стаціонарної платформи, робота в'язей від зміщення по всім трьом осям)							
363	3	-7,70	1,763	20	-35,42	1,1	0,239

Величини граничних вертикальних деформацій та горизонтальних зміщень зведені у табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Визначення прогинів і деформацій від комбінації впливів №5

Номер моделі	Вертикальні прогини $\Delta Z_{max}, мм$	Горизонтальні зміщення, мм		
		по 0x: $\Delta X_{max}$	по 0y: $\Delta Y_{max}$	Загальне $\Delta_{max}$
1	4,1	10,6	11,3	15,5
2	3,5	6,6	7,0	10,0
3	2,8	5,1	5,1	7,2

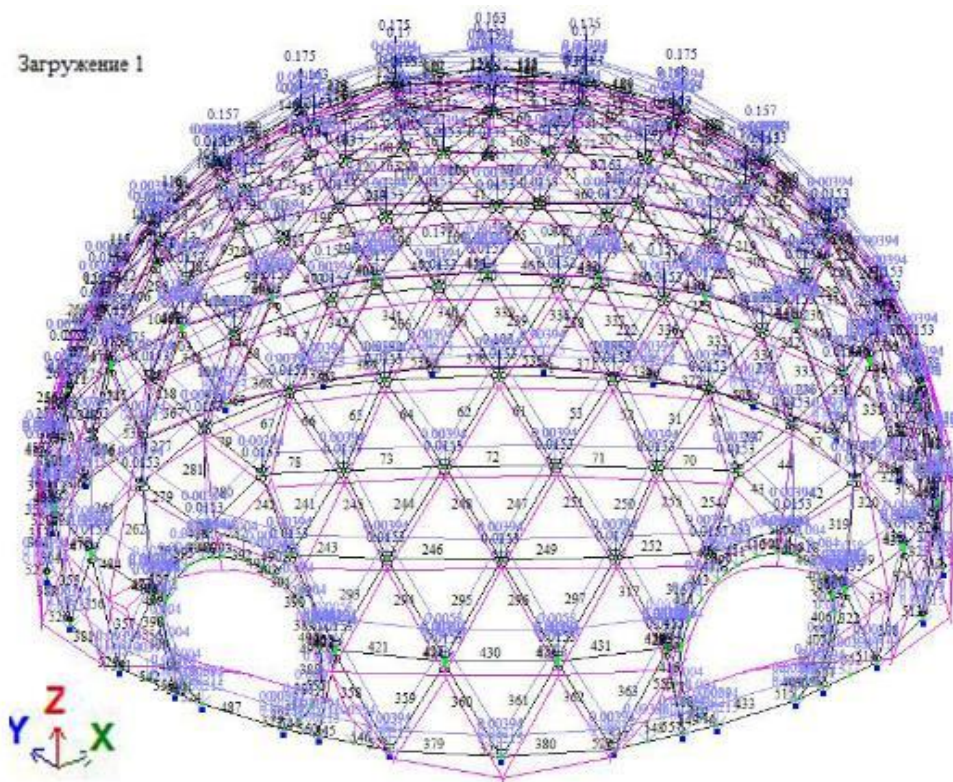


Рисунок 2.13 – Вихідна і деформована (показано рожевим) схеми куполу від навантажень за комбінацією №5 (власна вага + сніг і ожеледь), варіант моделі 1.

З табл. 2.8 добре видно, що деформації споруди найбільші для варіанту моделі 1. Вертикальні деформації (прогини) конструкцій куполу для найгіршого з варіантів моделей (модель 1) показані на рис. 2.14. Горизонтальні зміщення (деформації), по осі  $Oy$  – на рис. 2.15, горизонтальні зміщення (деформації), по осі  $Ox$  – на рис. 2.16.

Розрахункова величина вертикальних прогинів при розрахункових впливах (взято у запас) від комплексу постійних і тимчасових навантажень при схемі завантажень №5 (власна вага + сніг і ожеледь) найбільша для моделі 1. Деформації складають  $\Delta Z_{\max 1} = 4,1 \text{ мм}$  (рис. 15). Ці деформації незначні у порівнянні з геометричними розмірами самого Купола D13.5 і складають по відношенню до висоти  $H = 7750 \text{ мм}$ :  $\frac{\Delta Z_{\max 1}}{H} = \frac{4,1}{7750} = \frac{1}{1850}$ . Співвідношення вертикальних деформацій до

найбільшого прольоту (діаметру) купола:  $\frac{\Delta Z_{\max 1}}{D} = \frac{4,1}{13500} = \frac{1}{3292}$ .



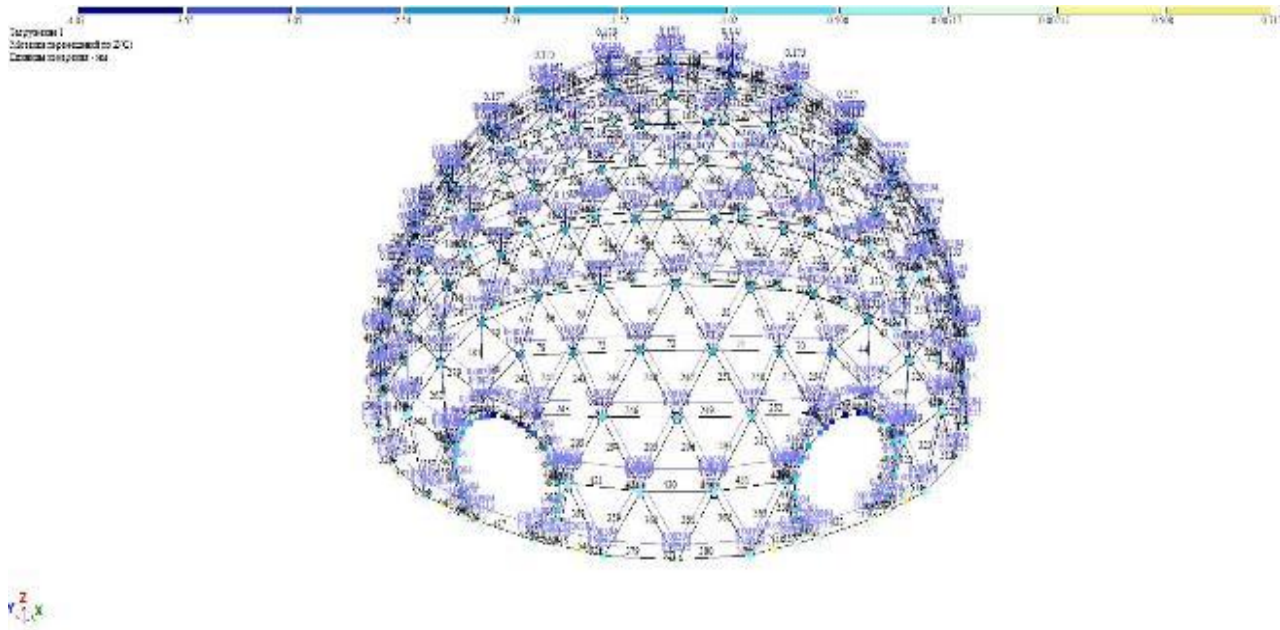


Рисунок 2.15. – Вертикальні деформації металокаркасу купола від навантажень за комбінацією №5 (власна вага + сніг і ожеледь), визначені від розрахункових впливів.

Гранично допустимі прогини для геодезичних куполів окремо не нормуються. Згідно з ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення [15] та ДБН В.2.6-220:2017. Покриття будівель і споруд [11, С. 21 - 22] для покрівель, до яких можна віднести і геодезичні куполи, існує вимога розрахунку по деформативності.

Для конструкцій покриттів з малими прольотами згідно з ДСТУ Б В.1.2-3:2006.

Прогини і переміщення [16]  $f_{ul} = \frac{D}{200} = \frac{13500}{200} = 67,5 \text{ мм}.$

Умова жорсткості:

$$(\Delta Z_{\max 1} \cdot K = 4,1 \cdot 1,1 = 4,6 \text{ мм}) < (f_{ul} = 67,5 \text{ мм}).$$

Умову жорсткості у вертикальній площині деформації виконано. Жорсткість куполу забезпечена.

Розраховуємо горизонтальні деформації. Розрахункова величина горизонтальних деформацій при розрахункових впливах (взято у запас) від комплексу постійних і тимчасових навантажень при схемі завантажень №5 (власна

вага + сніг і ожеледь) по 0у найбільша для моделі 1. Деформації складають  $\Delta Y_{\max 1} = 11,3 \text{ мм}$  (рис. 2.15).

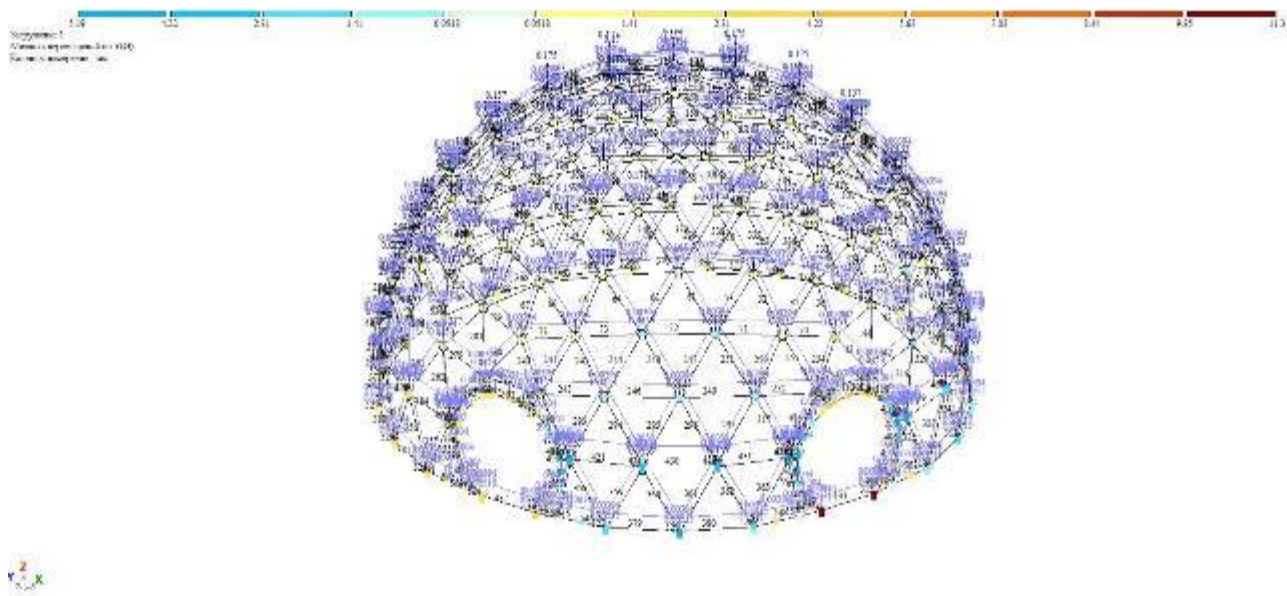


Рисунок 2.15 – Горизонтальні деформації (по 0у) металокаркасу купола від навантажень за комбінацією №5 (власна вага + сніг і ожеледь), визначені від розрахункових впливів.

Те саме по 0х:  $\Delta X_{\max 1} = 10,6 \text{ мм}$  (рис. 17). Загальне максимальне горизонтальне зміщення:  $\Delta_{\max 1} = \sqrt{\Delta X_{\max 1}^2 + \Delta Y_{\max 1}^2} = \sqrt{11,3^2 + 10,6^2} = 15,5 \text{ (мм)}$ .

Ці деформації незначні у порівнянні з геометричними розмірами самого Купола D13.5 і складають:  $\frac{\Delta_{\max 1}}{D} = \frac{15,5}{13500} = \frac{1}{871}$ .

Гранично допустимі горизонтальні зміщення для геодезичних каркасних куполів окремо не нормуються. Однак, з естетико-психологічних умов, вони не повинні перевищувати величини  $s_u = h_s / 200 = 7750 / 200 = 38,8 \text{ (мм)}$ .

$(\Delta_{\max 1} \cdot K = 15,5 \cdot 1,1 = 17,05 \text{ мм}) < (s_u = 38,8 \text{ мм})$ . Умова жорсткості Куполу в горизонтальній площині виконана.

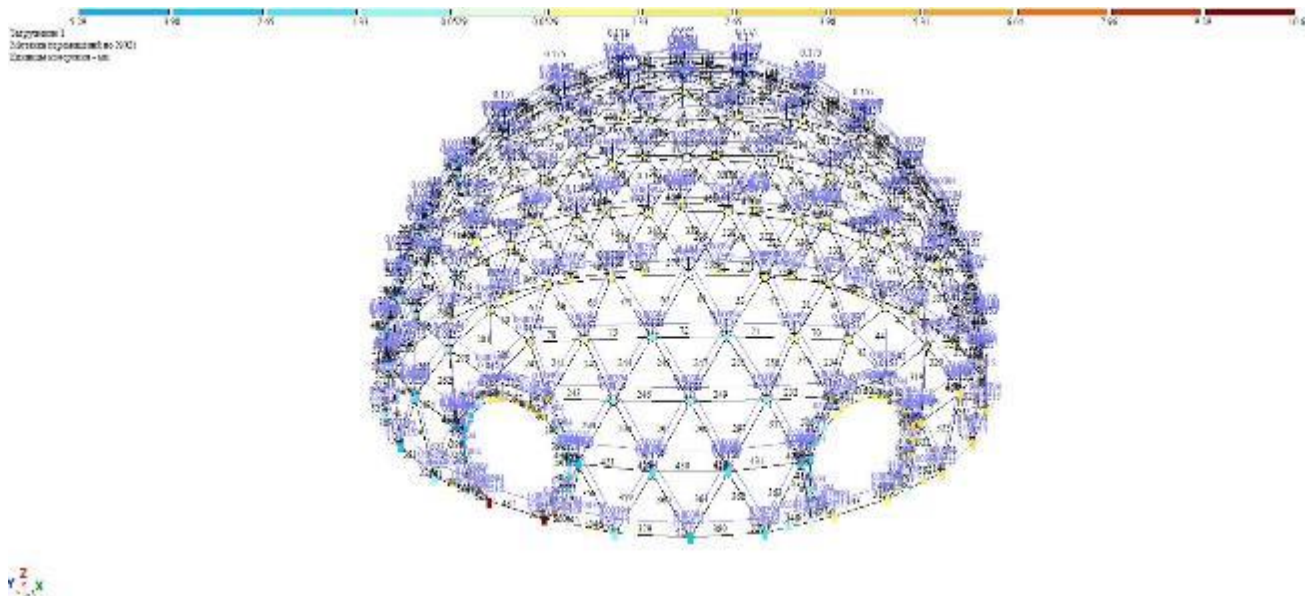


Рисунок 2.16 – Горизонтальні деформації (по  $0x$ ) металокаркасу Купола D13.5 від навантажень за комбінацією №5 (власна вага + сніг і ожеледь), визначені від розрахункових впливів.

Купол може бути змонтований в цих кліматичних умовах з урахуванням експлуатаційних обмежень, обумовлених вимогами до тентового покриття.

Проводимо розрахунок стійкості купола. Розрахунки стійкості каркасного куполу виконані від граничних характеристичних впливів, зібраних згідно з ДБН В.1.2-2:2006 під дією комплексу кліматичних навантажень за комбінацією №5 (власна вага + розрахунковий сніг + ожеледь).

За результатами скінчено елементного розрахунку коефіцієнт запасу стійкості за 1-ою формою складає 4,562. Коефіцієнти запасу стійкості для моделі 2 – 4,566, для моделі 3 – 4,465. Умову стійкості виконано.

Форма втрати стійкості для варіанту моделі 3 (де спостерігається найменший коефіцієнт запасу стійкості) при комбінації навантажень №5 показана на рис. 2.17. Перша форма пов'язана з можливим викривленням (випучуванням) стрижневих елементів на верхівці споруди.

Стійкість конструкцій куполу при впливі власної ваги, снігу і ожеледі, забезпечена.

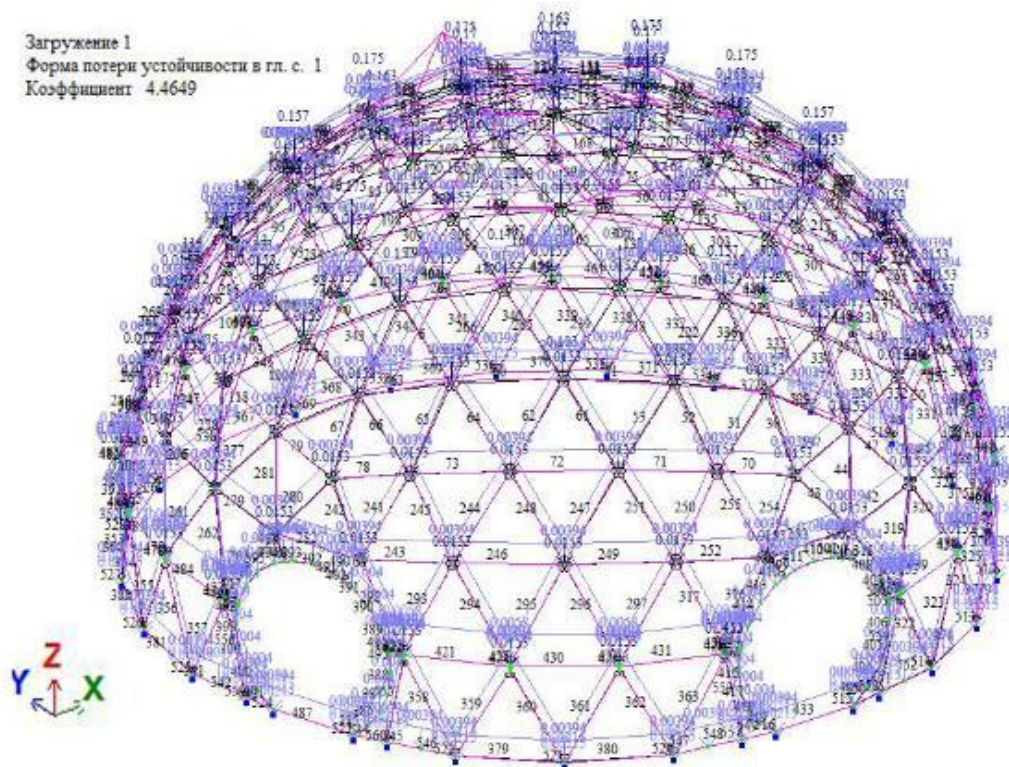


Рисунок 2.17. Втрата стійкості конструкцій каркасного куполу за 1-ою формою для моделі 1 (викривлення стрижнів верхньої поверхні).

Проводимо розрахунок за комбінацією №2 (власна вага + вітер). Проводимо розрахунок за 1 групою граничних станів. За результатами скінчено елементного моделювання отримано значення внутрішніх зусиль у елементах напружень у опорному та формоутворюючому кільцях куполу від розрахункових впливів по комбінації №2 (власна вага + вітер), визначених згідно з ДБН В.1.2-2:2006 (рис. 2.18 ... рис. 2.20).

Модель 1:

З рис. 2.18 – 2.19 добре видно, що у опорному кільці виникають максимальні зусилля розтягу, які складають  $N_{к, \max 1} = +0,196 \text{ т} = +1,96 \text{ кН}$ . Максимальні стискаючі зусилля  $N_{к, \min 1} = -0,274 \text{ т} = -2,74 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  $M_{к, \max 1} = +0,0148 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,148 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

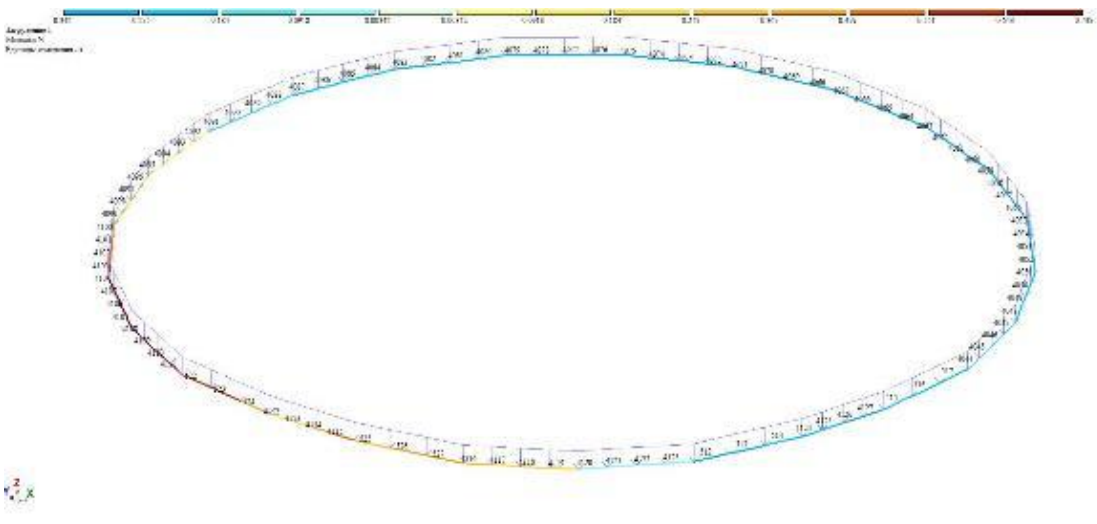
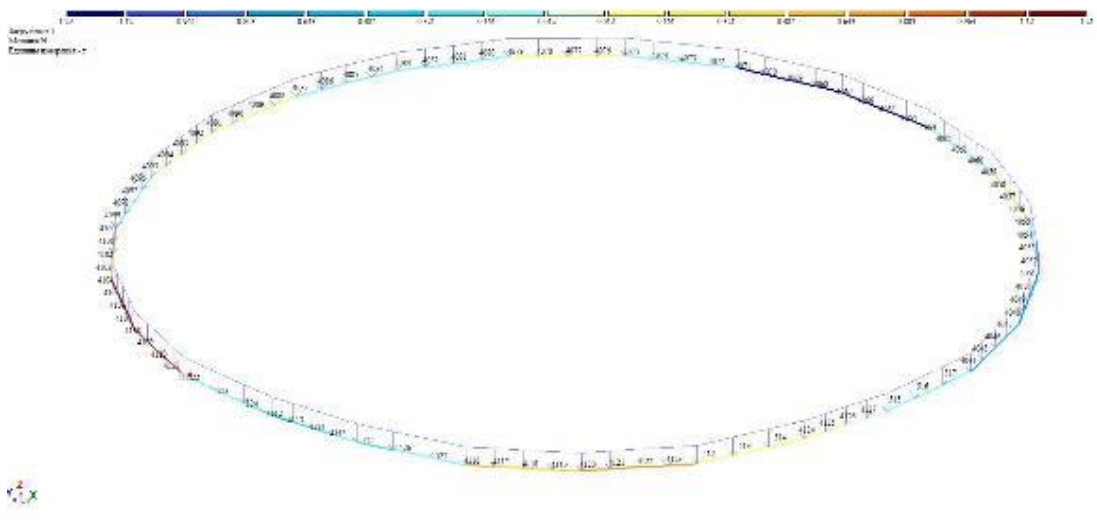
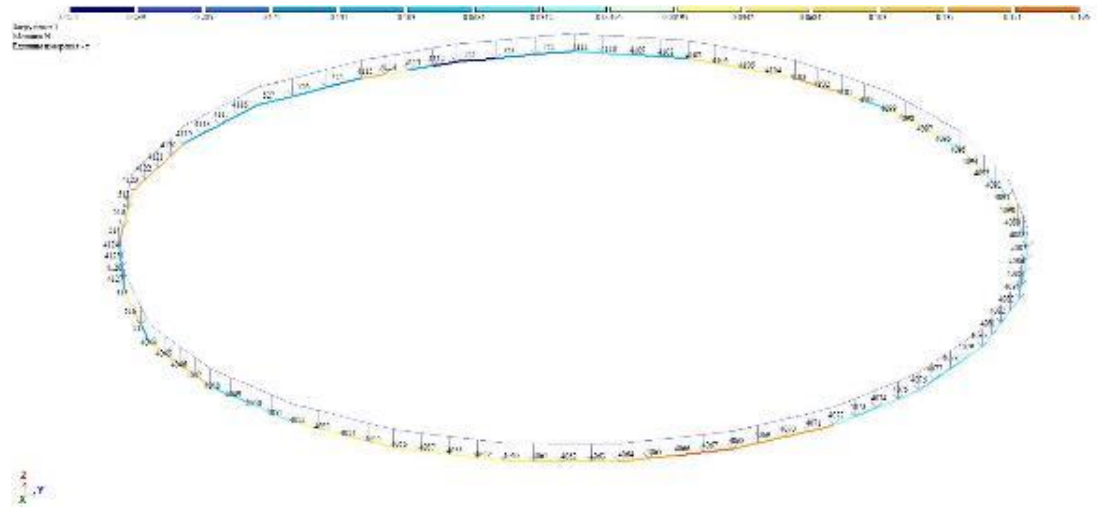
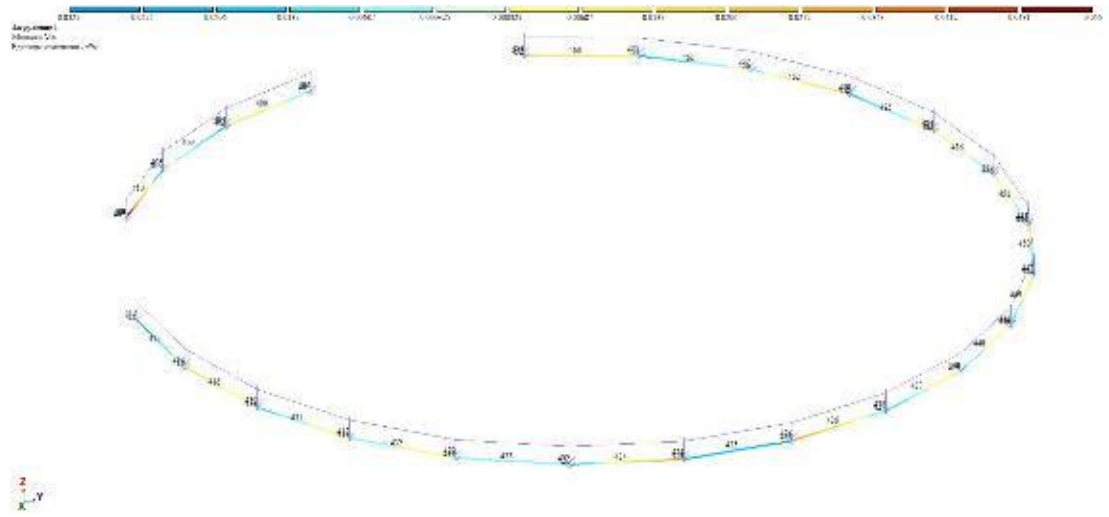
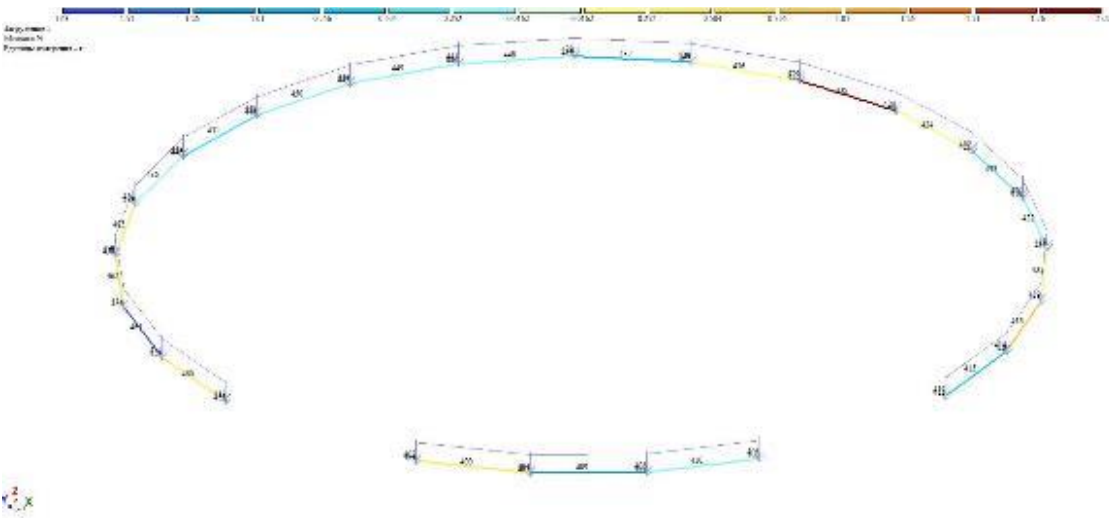


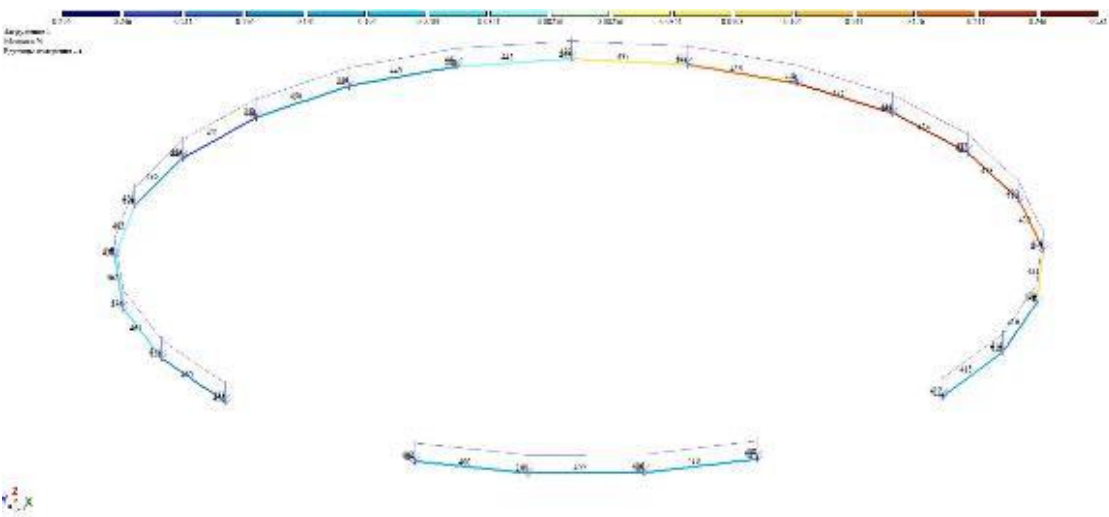
Рисунок 2.18 - Розподіл осьових зусиль  $N$ , [Т], у опорному кільці від навантажень за комбінацією №2 (власна вага + вітер): а – модель 1, б – модель 2, в – модель 3.



а)



б)



в)

Рисунок 2.19. - Розподіл осьових зусиль  $N$ , [Т], формоутворюючому кільці від навантажень за комбінацією №2 (власна вага + вітер): а – модель 1, б – модель 2, в – модель 3.

У формоутворюючому кільці виникають максимальні зусилля розтягу, які складають  $N_{\phi, \max 1} = +0,055 \text{ т} = +0,55 \text{ кН}$ . Максимальні стискаючі зусилля  $N_{\phi, \min 1} = -0,033 \text{ т} = -0,33 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  $M_{\phi, \max 1} = +0,055 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,55 \text{ кН} \cdot \text{м}$

Модель 2:

У опорному кільці виникають максимальні зусилля розтягу, які складають  $N_{\kappa, \max 2} = +1,21 \text{ т} = +12,1 \text{ кН}$ . Максимальні стискаючі зусилля  $N_{\kappa, \min 2} = -1,29 \text{ т} = -12,9 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  $M_{\kappa, \max 2} = +0,019 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,193 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

У формоутворюючому кільці виникають максимальні зусилля розтягу, які складають  $N_{\phi, \max 2} = +2,02 \text{ т} = +20,2 \text{ кН}$ . Максимальні стискаючі зусилля  $N_{\phi, \min 2} = -1,63 \text{ т} = -16,3 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  $M_{\phi, \max 2} = +0,081 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,81 \text{ кН} \cdot \text{м}$

Модель 3:

У опорному кільці виникають максимальні зусилля розтягу, які складають  $N_{\kappa, \max 3} = +0,735 \text{ т} = +7,35 \text{ кН}$ . Максимальні стискаючі зусилля  $N_{\kappa, \min 3} = -0,342 \text{ т} = -3,42 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  $M_{\kappa, \max 3} = +0,008 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,080 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

У формоутворюючому кільці виникають максимальні зусилля розтягу, які складають  $N_{\phi, \max 3} = +0,281 \text{ т} = +2,81 \text{ кН}$ . Максимальні стискаючі зусилля  $N_{\phi, \min 3} = -0,256 \text{ т} = -2,56 \text{ кН}$ . Максимальний за модулем згинальний момент:  $M_{\phi, \max 3} = +0,018 \text{ т} \cdot \text{м} = +0,18 \text{ кН} \cdot \text{м}$

Порівняння результатів розрахунку для різних варіантів моделей свідчить, що для опорного та формоутворюючого кілець, внаслідок перерозподілу внутрішніх зусиль, найгіршим є варіант розрахункової моделі №2 (відображає

роботу конструкції у варіанті привантаження п'яти опорних точок баластом великої ваги за рис. 2.7).

До розрахунку приймаємо значення внутрішніх силових факторів з моделі №2. Для опорного кільця (розрахункова довжина типового елемента  $l_{ef, \kappa} = 1,748 \text{ м}$ ; переріз – труба 42 х 3 мм зі Сталі 20; площа перерізу  $A_{\kappa} = 3,676 \text{ см}^2$ ; площа нетто з урахуванням послаблення отвором діаметром 17 мм для болта М14  $A_{\kappa n} = A_{\kappa} - 2 \cdot t \cdot d_o = 3,676 - 2 \cdot 0,3 \cdot 1,7 = 2,656 \text{ см}^2$ ; момент інерції  $I_{\kappa} = 7,03 \text{ см}^4$ ; радіус інерції  $i_{\kappa} = \sqrt{I_{\kappa} / A_{\kappa}} = \sqrt{7,03 / 3,676} = 1,383 \text{ см}$ ; момент опору  $W_{\kappa} = I_{\kappa} / (d / 2) = 7,03 / (4,2 / 2) = 3,347 \text{ см}^3$ ):

Максимальні зусилля розтягу:  $N_{\kappa, \max} = N_{\kappa, \max 2} = +12,1 \text{ кН}$ .

Граничні стискаючі зусилля  $N_{\kappa, \min} = N_{\kappa, \min} = -12,9 \text{ кН}$ .

Максимальний за модулем згинальний момент:

$$M_{\kappa, \max} = M_{\kappa, \max 2} = +0,193 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Умова міцності на дію тільки повздовжньої сили при розтязі на сплющеній ділянці, послабленій наскрізним отвором:

$$\alpha = \frac{N_{\kappa, \max} \cdot \gamma_n^I \cdot K}{A_{\kappa n} \cdot R_y \cdot \gamma_c} = \frac{12,1 \cdot 10^3 \cdot 1,1}{2,656 \cdot 10^{-4} \cdot 225 \cdot 10^6 \cdot 1,0} = 0,223 < 1. \text{ Умову міцності виконано.}$$

Гнучкість:

$\lambda_{\kappa} = l_{ef, \kappa} / i_{\kappa} = 1748 / 13,83 = 126,4$ . Тип поперечного перерізу – трубчастий. Тип кривої стійкості за табл. 8.1 ДБН В.2.6-198:2014 – «а».

$$\text{Умозна гнучкість } \bar{\lambda}_{\kappa} = \lambda_{\kappa} \cdot \sqrt{R_y / E} = 126,4 \cdot \sqrt{225 / 206000} = 4,178 > 3,8.$$

$$\text{Коефіцієнт } \delta = 9,87 \cdot (1 - \alpha + \beta \cdot \bar{\lambda}_{\kappa}) + \bar{\lambda}_{\kappa}^2 = 9,87 \cdot (1 - 0,03 + 0,06 \cdot 4,178) + 4,178^2 = 29,5$$

Коефіцієнт повздовжнього згину:



$$\varphi = \frac{0,5}{\lambda_k^2} \cdot \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \cdot \bar{\lambda}_k^2} \right) = \frac{0,5}{4,178^2} \cdot \left( 29,5 - \sqrt{29,5^2 - 39,48 \cdot 4,178^2} \right) = 0,459.$$

Граничне значення  $\varphi = \frac{7,6}{\lambda_k^2} = \frac{7,6}{4,178^2} = 0,435$ . З двох обчислених вибираємо

менше  $\varphi = 0,435$ .

Умова стійкості на дію тільки повздовжньої сили:

$$\alpha = \frac{N_{k, \min} \cdot \gamma_n^I \cdot K}{\varphi \cdot A_k \cdot R_y \cdot \gamma_c} = \frac{12,9 \cdot 10^3 \cdot 1,1}{0,435 \cdot 3,676 \cdot 10^{-4} \cdot 225 \cdot 10^6 \cdot 1,0} = 0,4 < 1. \text{ Умову виконано.}$$

Ексцентриситет прикладання осьової сили  
 $e = M / N = 0,193 / 12,9 = 0,015 (м)$

$$\text{Відносний ексцентриситет } m = \frac{e \cdot A_k}{W_c} = \frac{0,015 \cdot 3,676 \cdot 10^{-4}}{3,347 \cdot 10^{-6}} = 1,65 < 5.$$

$$\bar{\lambda}_k = 4,178 < 5.$$

Коефіцієнт форми впливу перерізу:

$$\eta = (1,35 - 0,05 \cdot 1,65) - 0,01 \cdot (5 - 1,65) \cdot 4,178 = 1,128.$$

Приведений відносний ексцентриситет  $m_{ef} = m \cdot \eta = 1,65 \cdot 1,128 = 1,862$ .

Коефіцієнт стійкості при позацентровому стиску за інтерполяцією по табл. Ж.3 при  $m_{ef} = 1,862$  та  $\bar{\lambda} = 4,178$ :  $\varphi_e = 0,216$ .

Умова стійкості на дію повздовжньої сили та згинального моменту:

$$\alpha = \frac{N_{k, \min} \cdot \gamma_n^I \cdot K}{\varphi_e \cdot A_k \cdot R_y \cdot \gamma_c} = \frac{12,9 \cdot 10^3 \cdot 1,1}{0,216 \cdot 3,676 \cdot 10^{-4} \cdot 225 \cdot 10^6 \cdot 1,0} = 0,81 < 1. \text{ Умову виконано.}$$

Всі умови за першою групою граничних станів для елементів опорного кільця виконано. Максимальний коефіцієнт використання перерізу  $\alpha = 0,81$  при роботі на стійкість при одночасній дії стискаючої сили і згинального моменту.

Для формоутворюючого кільця (розрахункова довжина типового елемента  $l_{ef, \phi} = 1,748$  м; переріз – гнутий профіль 50 x 50 x 3 мм зі сталі С245; площа перерізу  $A_{\phi} = 5,41$  см<sup>2</sup>; площа нетто з урахуванням послаблення отвором діаметром 17 мм для

болта М14  $A_{\phi n} = A_{\phi} - 2 \cdot t \cdot d_o = 5,41 - 2 \cdot 0,3 \cdot 1,7 = 4,39 \text{ см}^2$ ; момент інерції  $I_{\phi, x} = 19,45 \text{ см}^4$ ; радіус інерції  $i_{\phi} = \sqrt{I_{\phi} / A_{\phi}} = \sqrt{19,45 / 5,41} = 1,896 \text{ см}$ ; момент опору  $W_{\phi} = I_{\phi} / (b/2) = 19,45 / (5/2) = 7,78 \text{ см}^3$ ):

Максимальні зусилля розтягу:  $N_{\phi, \max} = N_{\phi, \max 2} = +20,2 \text{ кН}$ .

Граничні стискаючі зусилля  $N_{\phi, \min} = N_{\phi, \min 2} = -16,3 \text{ кН}$ .

Максимальний за модулем згинальний момент:  $M_{\phi, \max} = M_{\phi, \max 2} = +0,81 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

Умова міцності на дію тільки повздовжньої сили при розтязі на ділянці, послабленій наскрізним отвором:

$$\alpha = \frac{N_{\phi, \max} \cdot \gamma_n^I \cdot K}{A_{\phi n} \cdot R_y \cdot \gamma_c} = \frac{20,2 \cdot 10^3 \cdot 1,1}{4,39 \cdot 10^{-4} \cdot 240 \cdot 10^6 \cdot 1,0} = 0,222 < 1. \text{ Умову міцності}$$

виконано.

Гнучкість:

$\lambda_{\phi} = l_{ef, \phi} / i_{\phi} = 1748 / 18,96 = 92,2$ . Тип поперечного перерізу – гнугий квадратний. Тип кривої стійкості за табл. 8.1 ДБН В.2.6-198:2014 – «а».

Умовна гнучкість  $\bar{\lambda}_{\phi} = \lambda_{\phi} \cdot \sqrt{R_y / E} = 92,2 \cdot \sqrt{240 / 206000} = 3,147 < 3,8$ .

Коефіцієнт

$$\delta = 9,87 \cdot (1 - \alpha + \beta \cdot \bar{\lambda}_{\phi}) + \bar{\lambda}_{\phi}^2 = 9,87 \cdot (1 - 0,03 + 0,06 \cdot 3,147) + 3,147^2 = 21,34.$$

Коефіцієнт повздовжнього згину:

$$\varphi = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_{\kappa}^2} \cdot \left( \delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \cdot \bar{\lambda}_{\kappa}^2} \right) = \frac{0,5}{3,147^2} \cdot \left( 21,34 - \sqrt{21,34^2 - 39,48 \cdot 3,147^2} \right) = 0,672.$$

Умова стійкості на дію тільки повздовжньої сили:

$$\alpha = \frac{N_{\phi, \min} \cdot \gamma_n^I \cdot K}{\varphi \cdot A_{\phi} \cdot R_y \cdot \gamma_c} = \frac{16,3 \cdot 10^3 \cdot 1,1}{0,672 \cdot 5,41 \cdot 10^{-4} \cdot 240 \cdot 10^6 \cdot 1,0} = 0,204 < 1. \text{ Умову}$$

виконано.

Ексцентриситет прикладання осьової сили  $e = M / N = 0,81 / 16,3 = 0,05 (\text{м})$ .

$$\text{Відносний ексцентриситет } m = \frac{e \cdot A_\phi}{W_c} = \frac{0,05 \cdot 5,41 \cdot 10^{-4}}{7,78 \cdot 10^{-6}} = 3,48 < 5.$$

$$\bar{\lambda}_\phi = 3,147 < 5.$$

Коефіцієнт форми впливу перерізу:

$$\eta = (1,35 - 0,05 \cdot 3,48) - 0,01 \cdot (5 - 3,48) \cdot 3,147 = 1,128.$$

$$\text{Приведений відносний ексцентриситет } m_{ef} = m \cdot \eta = 3,48 \cdot 1,128 = 3,93.$$

Коефіцієнт стійкості при позacentровому стиску за інтерполяцією по табл. Ж.3 при  $m_{ef} = 3,93$  та  $\bar{\lambda} = 3,147$ :  $\varphi_e = 0,164$ .

Умова стійкості на дію повздовжньої сили та згинального моменту:

$$\alpha = \frac{N_{\phi, \min} \cdot \gamma_n^I \cdot K}{\varphi_e \cdot A_\phi \cdot R_y \cdot \gamma_c} = \frac{16,3 \cdot 10^3 \cdot 1,1}{0,164 \cdot 5,41 \cdot 10^{-4} \cdot 240 \cdot 10^6 \cdot 1,0} = 0,85 < 1. \text{ Умову виконано.}$$

Всі умови за першою групою граничних станів для елементів формоутворюючого кільця виконано. Максимальний коефіцієнт використання перерізу  $\alpha = 0,85$  при роботі на стійкість при одночасній дії стискаючої сили і згинального моменту.

Проводимо розрахунок типових елементів каркасу. Внутрішні силові фактори у типових елементах складаються, в основному, з осьових сил розтягу-стиску. Розрахунком встановлено, що величина згинальних моментів у всіх елементах при всіх варіантах завантаження вітровим впливом не перевищує величини  $M_{\max} = 0,0323 \text{ кН} \cdot \text{м}$ , що на три порядки менше величини осьової сили. Тому впливом згинального моменту можна знехтувати.

Переріз типових елементів – труба 42 x 3 мм зі Сталі 20; площа перерізу  $A = 3,676 \text{ см}^2$ ; площа нетто з урахуванням послаблення отвором діаметром 17 мм для болта М14  $A_n = A - 2 \cdot t \cdot d_o = 3,676 - 2 \cdot 0,3 \cdot 1,7 = 2,656 \text{ см}^2$ . Радіус інерції  $i = 1,383 \text{ см}$ . В табл. 2.9 несуча здатність при розтязі, з урахуванням послаблення наскрізним отвором, обчислена за формулою:

$$N_{u, \max} = A_n \cdot R_y \cdot \gamma_c = 2,656 \cdot 10^{-4} \cdot 225 \cdot 10^6 \cdot 1,0 = 59,76 \text{ (кН)}.$$

Несуча здатність при стиску:

$$N_{u,\min} = -\varphi \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_c = -3,676 \cdot 10^{-4} \cdot 225 \cdot 10^6 \cdot 1,0 \cdot \varphi = -82,71 \cdot \varphi \text{ (кН)}.$$

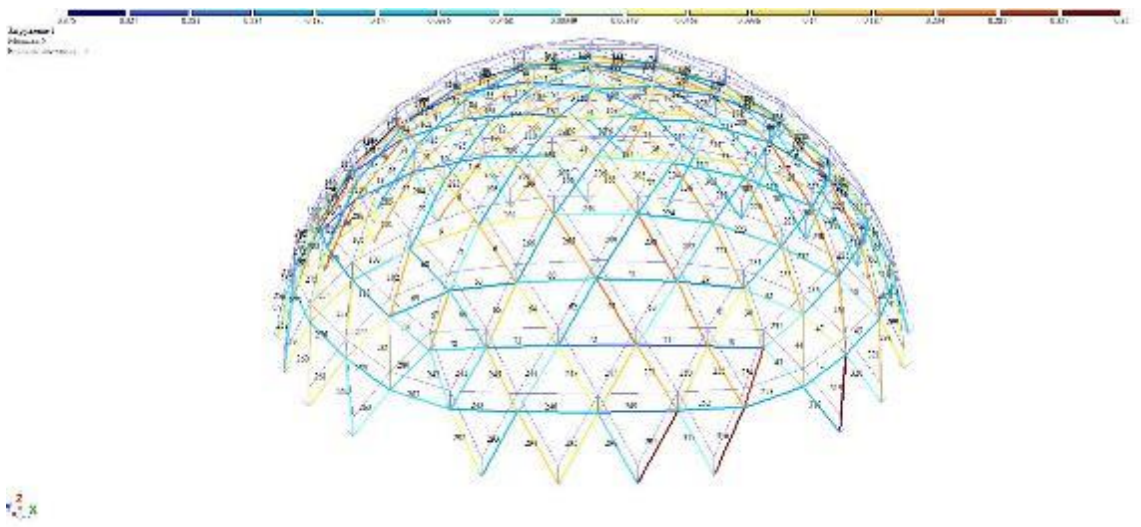
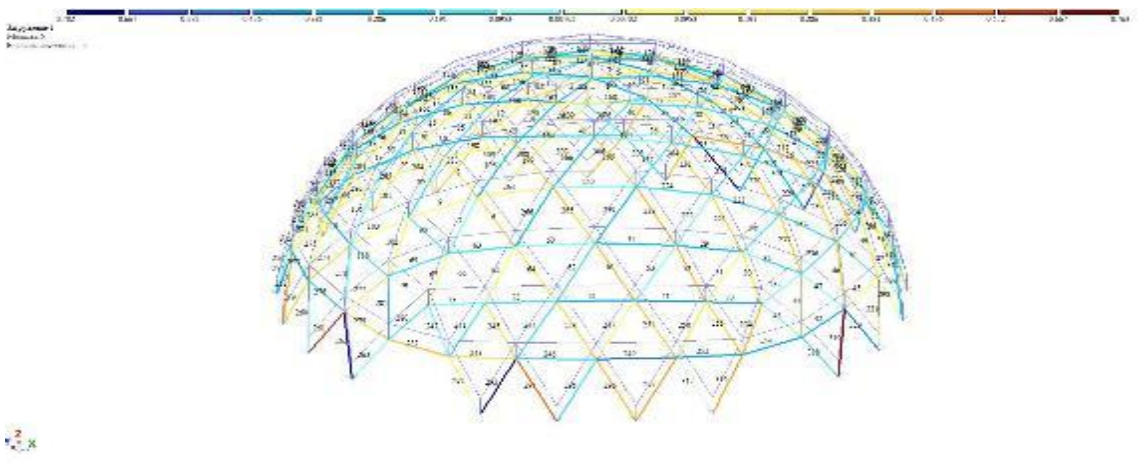
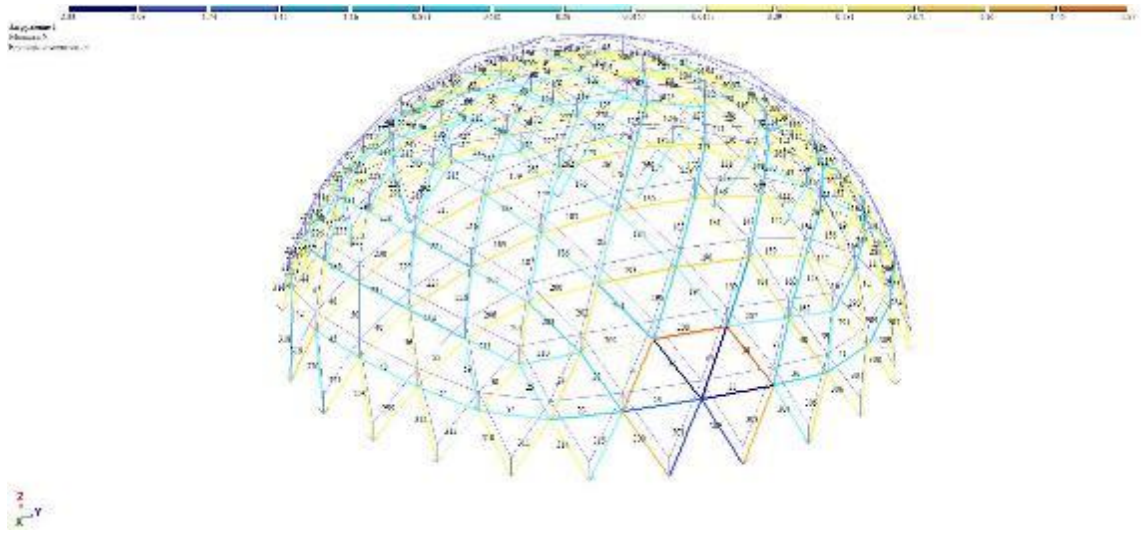


Рисунок 2.20 – Розподіл осьових зусиль,  $N$ , [Т], у типових елементах Куполу у від навантажень за комбінацією №2 (власна вага + вітер): а – модель 1, б – модель 2, в – модель 3.

З табл. 2.9 добре видно, що максимальний коефіцієнт використання типових навантажених елементів моделі (0,64) не перевищує 1. Умову міцності та стійкості виконано.

Виконуємо розрахунок для опорних підкосів при комбінації №5. Зусилля у опорних підкосах циліндричної частини каркасу куполу, що виконані з круглих труб діаметром 42 мм та товщиною стінки 3 мм зі Сталі 20, площа перерізу яких ; площа нетто з урахуванням послаблення отвором діаметром 17 мм для болта М14 ; радіус інерції , зведені до таблиці 10. Аналіз моделей доводить, що у підкосах, на відміну від комбінації навантаження №2, виникають внутрішні зусилля стиску і розтягу, причому, найгірший варіант моделі в цьому випадку – модель 2.

З табл. 2.10 добре видно, що максимальний коефіцієнт використання підкосів (0,877) не перевищує 1. Умову міцності та стійкості підкосів виконано.

Таблиця 2.9 – Визначення внутрішніх зусиль і коефіцієнтів використання у типових стрижневих елементах каркасу при вітровому впливі

№ елемента	Номер моделі	Осьове зусилля $N, \text{кН}$	Розрахункова довжина $l = \mu \cdot l_{ef}, \text{м}$	Сталь	Несуча здатність, $N_{ub}, \text{кН}$	Коефіцієнт надійності К	Коефіцієнт використання, $\alpha$
Модель 1 (привантаження невеликим баластом кожної опорної точки, можливість незначних горизонтальних зміщень)							
38	1	+15,61	1,667	Сталь 20	+59,76	1,1	0,288
208	1	+15,11	1,652		+59,76	1,1	0,279
33	1	-21,00	1,718		-37,30	1,1	0,62
34	1	-23,23	1,651		-40,38	1,1	0,64
Модель 2 (привантаження великим баластом 5 точок, неможливість їх зміщень по горизонталі, інші опорні точки працюють тільки на стиск)							
319	2	+7,57	1,659	Сталь 20	+59,76	1,1	0,14
261	2	+6,13	1,780		+59,76	1,1	0,113
303	2	-7,02	1,780		-34,74	1,1	0,222
293	2	-6,98	1,660		-39,95	1,1	0,193
Модель 3 (анкерування всіх опорних точок до стаціонарної платформи, робота в'язей від зміщення по всім трьом осям)							
316	3	+3,32	1,567	Сталь 20	+59,76	1,1	0,062
319	3	+3,44	1,659		+59,76	1,1	0,064
161	3	-3,24	1,560		-45,10	1,1	0,08
116	3	-3,74	1,52		46,75	1,1	0,088

Таблиця 2.10 – Визначення внутрішніх зусиль і коефіцієнтів використання у підкосах при вітровому впливі

№ елемента	Номер моделі	Осьове зусилля $N, кН$	Розрахункова довжина $l = \mu \cdot l_{ef}, м$	Сталь	Несуча здатність по стійкості, $N_{ub}, кН$	Коефіцієнт надійності $K$	Коефіцієнт використання, $\alpha$
Модель 1 (привантаження невеликим баластом кожної опорної точки, можливість незначних горизонтальних зміщень)							
322	1	+8,67	1,763	20	59,75	1,1	0,16
334	1	-6,80	1,764	20	-35,38	1,1	0,212
Модель 2 (привантаження великим баластом 5 точок, не можливість їх зміщень по горизонталі, інші опорні точки працюють тільки на стиск)							
355	2	+27,1	1,764	20	+59,75	1,1	0,5
335	2	-28,2	1,764	20	-35,38	1,1	0,877
Модель 3 (анкерування всіх опорних точок до стаціонарної платформи, робота в'язей від зміщення по всім трьом осям)							
363	3	+5,79	1,763	20	+59,75	1,1	0,107
531	3	-3,74	1,763	20	-35,42	1,1	0,117

Проводимо розрахунок за 2 групою граничних станів купола в цілому. Розрахунки за другою групою граничних станів виконані від експлуатаційних впливів, зібраних згідно з ДБН В.1.2-2:2006 за комбінацією №2 (власна вага + вітер). На попередніх етапах було доведено, що, внаслідок виникнення явища ковзання, відбувається втрата стійкості положення купола. Тому розглядати варіант моделі 1 на цьому етапі не доцільно.

Деформована схема каркасу наведена на рис. 2.21 (вектор результуючої вітрового впливу – вздовж  $0x$ ). Вертикальні прогини металевих конструкцій купола показані на рис. 2.22. Горизонтальні зміщення (деформації) по осі  $0y$  – на рис. 2.23, горизонтальні зміщення (деформації) по осі  $0x$  – на рис. 2.24.

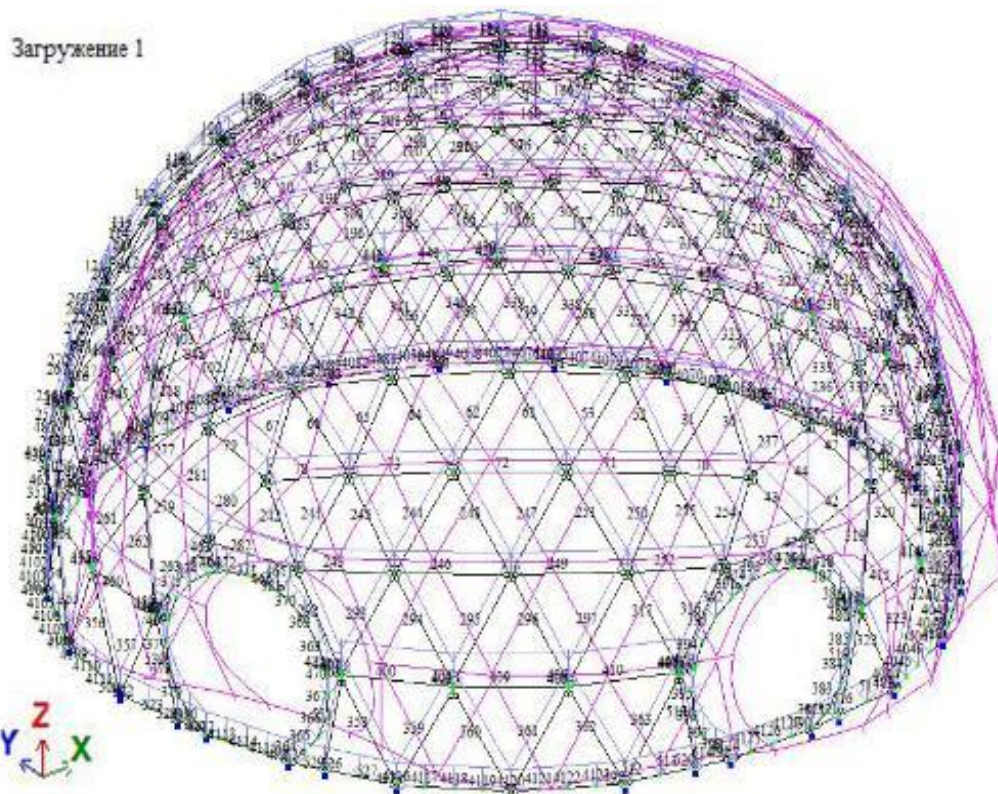


Рис. 2.21 - Вихідна і деформована схема куполу (показано рожевим) від навантажень за комбінацією №5 (власна вага + сніг і ожеледь), варіант моделі 2.

З табл. 2.11 видно, що деформації споруди найбільші для варіанту моделі 2.

Таблиця 2.11 – Визначення прогинів і деформацій від комбінації впливів №2

Номер моделі	Вертикальні прогини $\Delta Z_{\max}$ , мм	Горизонтальні зміщення, мм		
		по 0x: $\Delta X_{\max}$	по 0y: $\Delta Y_{\max}$	Загальне $\Delta_{\max}$
1	2,7	зсув	зсув	зсув
2	2,7	38,8	10,5	38,8
3	1,7	3,7	3,1	3,7

Знаходимо значення вертикальних прогинів. Розрахункова величина вертикальних прогинів при експлуатаційних впливах від комплексу постійних і тимчасових навантажень при схемі завантажень №5 (власна вага +



експлуатаційний вітер 20 м/с) найбільша для моделі 2. Деформації складають  $\Delta Z_{\max 2} = 2,7 \text{ мм}$  (рис. 23). Ці деформації незначні у порівнянні з геометричними розмірами самого купола і складають по відношенню до висоти  $H = 7750 \text{ мм}$ :

$$\frac{\Delta Z_{\max 2}}{H} = \frac{2,7}{7750} = \frac{1}{2870}.$$

Співвідношення вертикальних деформацій до найбільшого

прольоту (діаметру) купола:  $\frac{\Delta Z_{\max 2}}{D} = \frac{2,7}{13500} = \frac{1}{5000}.$

Гранично допустимі прогини для геодезичних куполів окремо не нормуються. Згідно з ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення [16] та ДБН В.2.6-220:2017. Покриття будівель і споруд [11, С. 21 – 22] для покрівель, до яких можна віднести і геодезичні куполи, існує вимога розрахунку по деформативності.

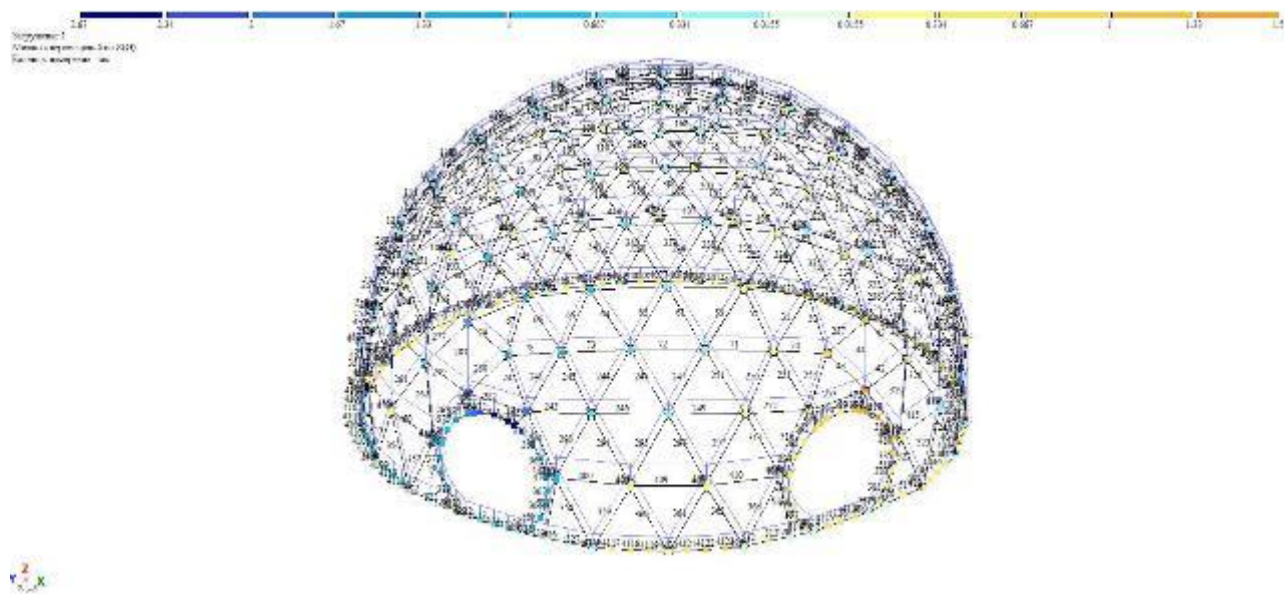


Рисунок 2.22 - Вертикальні деформації металокаркасу купола від навантажень за комбінацією №2 (власна вага + вітер експлуатаційний 20 м/с), визначені від розрахункових впливів.

Для конструкцій покриттів з малими прольотами згідно з ДСТУ Б В.1.2-3:2006.

Прогини і переміщення [16]  $f_{ul} = \frac{D}{200} = \frac{13500}{200} = 67,5 \text{ мм}.$

Умова жорсткості:

$$(\Delta Z_{\max 2} \cdot K = 2,7 \cdot 1,1 = 3 \text{ мм}) < (f_{ul} = 67,5 \text{ мм}).$$

Умову жорсткості у вертикальній площині деформації виконано. Жорсткість куполу забезпечена.

Визначаємо горизонтальні деформації. Розрахункова величина горизонтальних деформацій при експлуатаційний вітер впливах) від комплексу постійних і тимчасових навантажень при схемі завантажень №2 (власна вага + експлуатаційний вітер 20 м/с) по 0у найбільша для моделі 2. Деформації складають  $\Delta Y_{\max 2} = 10,5 \text{ мм}$  (рис. 2.23).

Те саме по 0x:  $\Delta X_{\max 2} = 38,8 \text{ мм}$  (рис. 2.24). Загальне максимальне горизонтальне зміщення: Більше значення  $\Delta_{\max 2} = \Delta X_{\max 2} = 38,8 \text{ мм}$ .

Ці деформації незначні у порівнянні з геометричними розмірами самого купола і складають:  $\frac{\Delta_{\max 2}}{D} = \frac{38,8}{13500} = \frac{1}{348}$ .

Гранично допустимі горизонтальні зміщення для геодезичних каркасних куполів окремо не нормуються. Однак, з естетико-психологічних умов, вони не повинні перевищувати величини .

Умова жорсткості Куполу в горизонтальній площині виконана. Запасу по деформаціям немає.

Купол може бути змонтований в цих кліматичних умовах з урахуванням експлуатаційних обмежень, обумовлених вимогами до тентового покриття.

Визначимо стійкість конструкцій куполу. Розрахунки стійкості каркасного куполу виконані від граничних характеристичних впливів, зібраних згідно з ДБН В.1.2-2:2006 під дією комплексу кліматичних навантажень за комбінацією №2 (власна вага + вітер). Для моделі 1 стійкість не забезпечена (доведено, що виникає зсув та можливе перекидання).

За результатами скінчено елементного розрахунку коефіцієнт запасу стійкості для моделі 3 за 1-ою формою складає 7,033.

Форма втрати стійкості каркасу куполу для варіанту моделі 3 при комбінації навантажень №2 показана на рис. 2.25. Перша форма пов'язана з можливим викривленням (випучуванням) стрижневих елементів по всій висоті споруди за напрямом вітру.

Стійкість конструкцій куполу при впливі власної ваги та вітру забезпечується тільки для моделі 3, тобто, на час ураганного вітру з урахуванням привантаження опор баластом у 5 точках (модель 2) слід розчалувати металокаркас. Для моделі 2 допускається тільки експлуатаційний вітер 20 м/с.

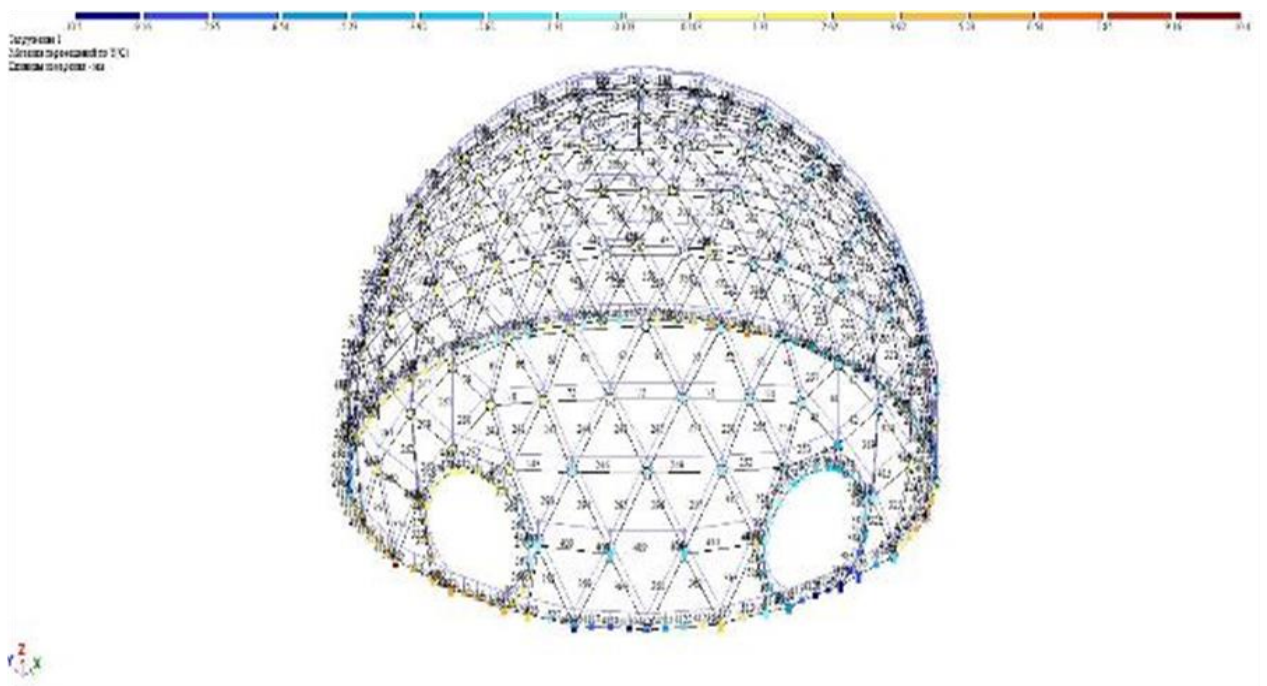


Рисунок 2.23 - Горизонтальні деформації (по  $Oy$ ) металокаркасу купола від навантажень за комбінацією №2 (власна вага + експлуатаційний вітер 20 м/с).

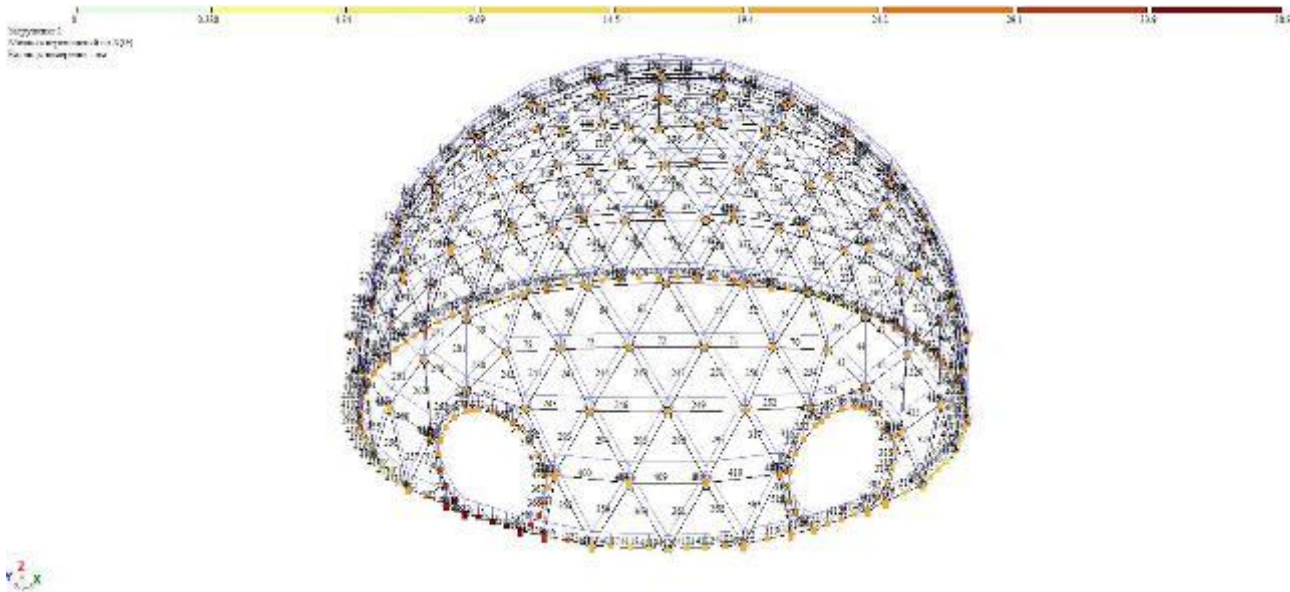


Рисунок 2.24 - Горизонтальні деформації (по  $Ox$ ) металокаркасу купола від навантажень за комбінацією №2 (власна вага + експлуатаційний вітер 20 м/с.

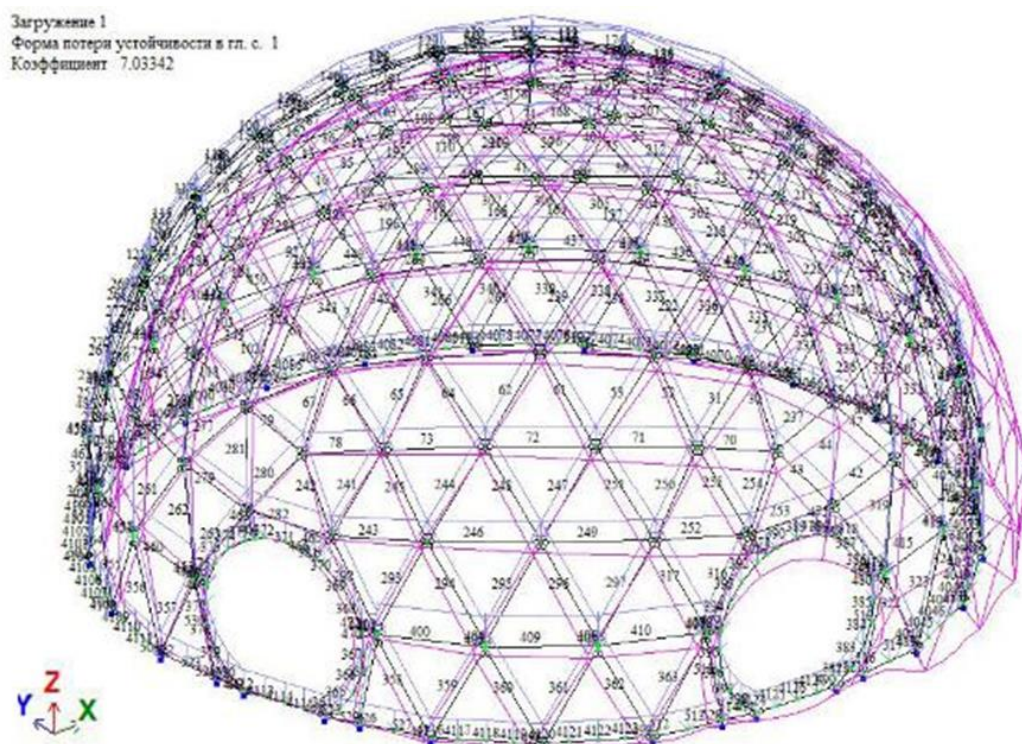


Рисунок 2.25 - Втрата стійкості конструкцій каркасного купола за 1-ою формою для моделі 3 (викривлення поверхні по всій висоті споруди в бік вітру).

### 2.3.4 Оцінка міцності тентового покриття

Оскільки на сьогодні відсутні достовірні нормативні вимоги з оцінки експлуатаційної придатності тентового покриття, виконаємо перевірку тенту на можливість появи локальних проривів для моделі 2 від експлуатаційних впливів по комбінації №2 (власна вага + вітер 20 м/с), визначених згідно з ДБН В.1.2-2:2006.

Межа міцності при розтязі матеріалу тентового покриття згідно інформації виробника  $\sigma_{b,t} = 40 \text{ МПа}$ . Вводимо сервісний коефіцієнт запасу міцності  $\gamma_u = 1,4$ . Відповідно, оціночне значення граничних напружень, які можуть виникати у тентового покритті, можна обчислити за виразом:

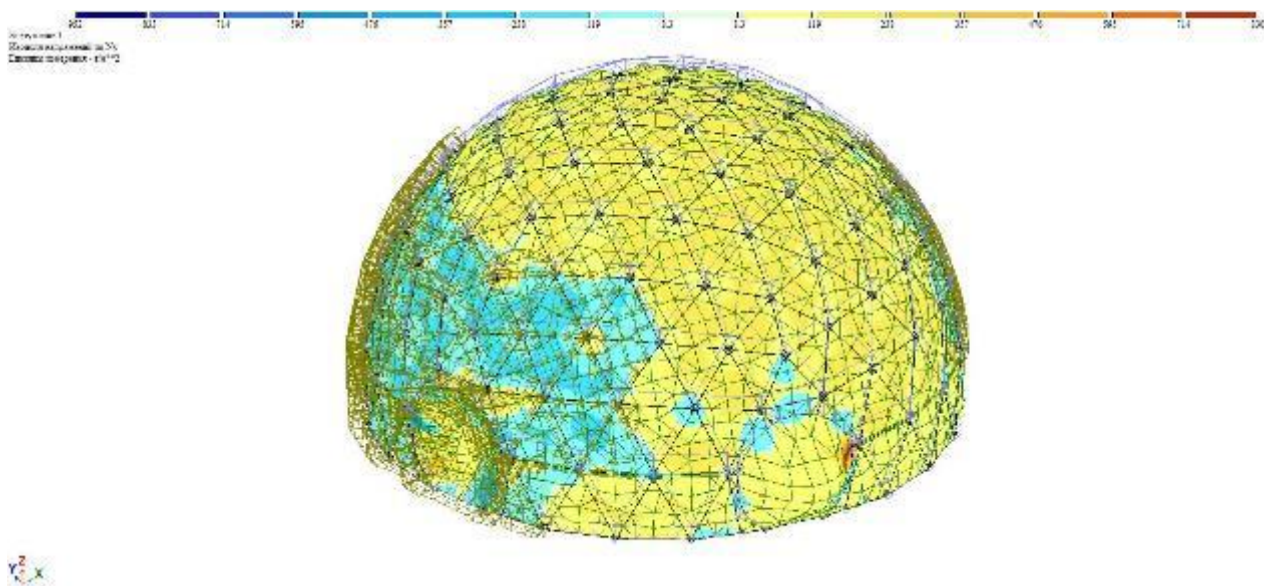
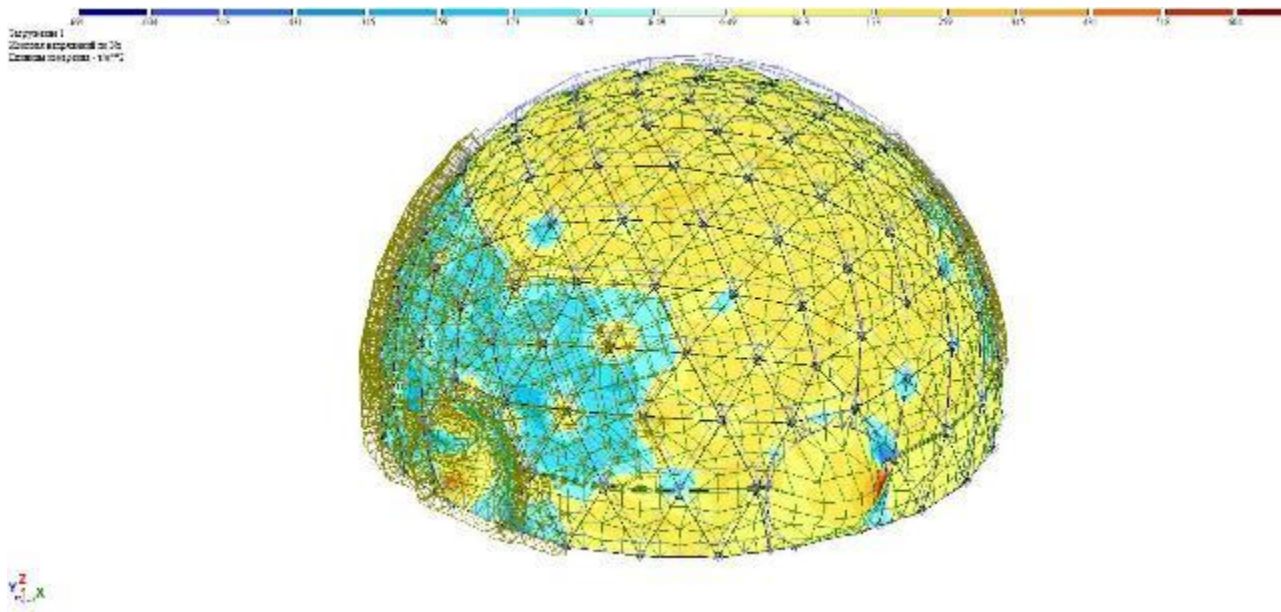
$$\sigma_{u,t} = \sigma_{b,t} / \gamma_u = 40 / 1,4 = 28,6 \text{ МПа}.$$

На рис. 2.26 та рис. 2.27 показані головні напруження у пластинчастих елементах тентового покриття виходячи з припущення про їх ізотропну роботу (однаково працюють на розтяг і стиск).

$$N_{x,\max} = +650 \text{ т} / \text{м}^2 = 6,5 \text{ МПа} . N_{x,\min} = -691 \text{ т} / \text{м}^2 = -6,91 \text{ МПа} .$$

$$N_{y,\max} = +830 \text{ т} / \text{м}^2 = 8,3 \text{ МПа} . N_{y,\min} = -952 \text{ т} / \text{м}^2 = -9,52 \text{ МПа} .$$

Стиснуті ділянки на рис. 2.26 та рис. 2.27 не адекватно відображають роботу тенту (покриття занадто гнучке). В місцях стиску покриття просто провисає. В розрахунковій моделі прийнято (у бік запасу), що тентове покриття не надає споруді більшої жорсткості. Тому, напруження, що виникають у тенті, пов'язані з викривленнями металокаркасу та локальними вигинами тенту на ділянках між трубчастими стрижнями.



Для урахування анізотропної роботи тентового покриття під навантаженням визначимо еквівалентні напруження за енергетичною теорією міцності. На рис. 2.28 показані еквівалентні напруження у пластинчастих елементах тентового покриття виходячи з припущення про їх ізотропну роботу (однаково працюють на розтяг і стиск).

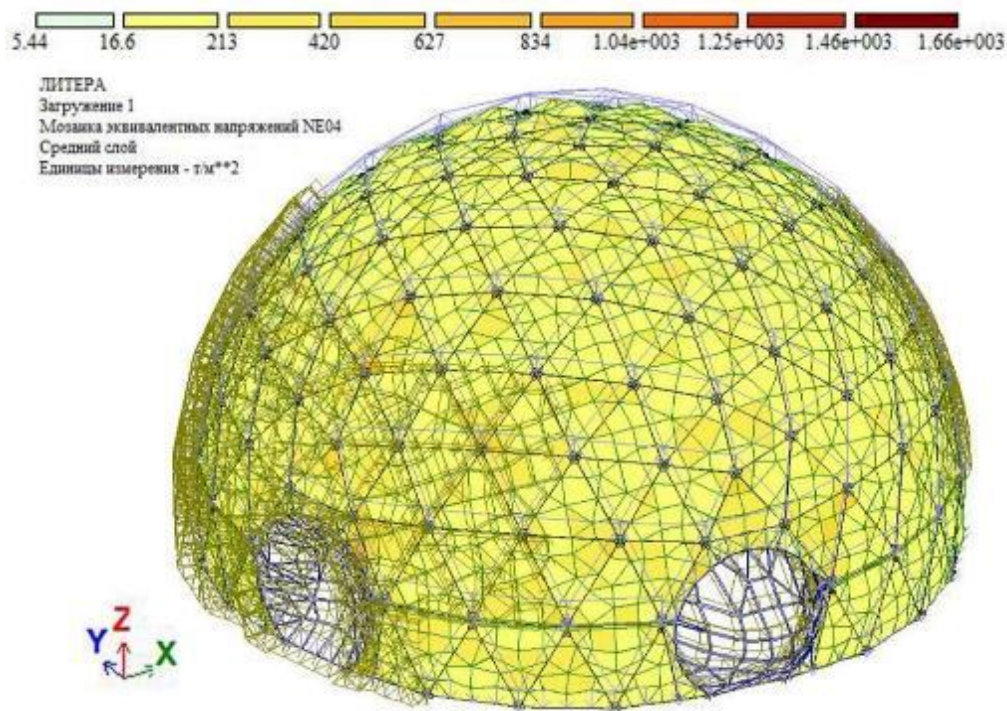


Рисунок 2.28 - Еквівалентні напруження у тентовому покритті для моделі 2.

З рис. 2.28 добре видно, що при ізотропній роботі у пластинчастих елементах тентового покриття виникають еквівалентні напруження, які, у окремих зонах, особливо на стику сферичної та циліндричної частин оболонки, а також, поблизу дверних прорізів, сягають значень  $\sigma_{\text{eqv,max}} = 1660 \text{ т} / \text{м}^2 = 16,6 \text{ МПа}$ .

Ці напруження необхідно збільшити з урахуванням анізотропної поведінки тенту під навантаженням з урахуванням коефіцієнта  $\gamma_{ft} = 1,4$ :

$$\sigma_{\text{red,max}} = \sigma_{\text{eqv,max}} \cdot \gamma_{ft} = 16,6 \cdot 1,4 = 23,24 (\text{МПа}).$$

Умова міцності тентового покриття за оціночними піковими значеннями еквівалентних напружень:

$$(\sigma_{\text{red,max}} \cdot K = 23,24 \cdot 1,1 = 25,56 \text{ МПа}) < (\sigma_{\text{u,t}} = 28,6 \text{ МПа}).$$

Умову виконано. Оціночна міцність тентового покриття куполу забезпечена. Коефіцієнт використання 0,9.

### 2.3.5 Оцінка міцності болтів

Для перевірки міцності болтів кріпильних елементів з розрахункових таблиць 6,7, 9 10 виписуємо максимальне за модулем зусилля розтягу-стиску, що може виникати у елементах споруди:  $N_{\max} = 28,2 \text{ кН}$ . Зсуву піддається одноболтове з'єднання на болтах М14 класу міцності 8.8.

Механічні характеристики болтів:

Розрахунковий опір болтів при зсуві  $R_{bs} = 320 \text{ МПа}$ .

Розрахунковий опір болтів при розтязі  $R_{bt} = 435 \text{ МПа}$ .

Площа перерізу болтів діаметром  $d_b = 14 \text{ мм}$  за ГОСТ 1759.4 (ISO 898/1-78):

Брутто:  $A_b = 1,53 \text{ см}^2$ ;

Нетто:  $A_{bn} = 1,15 \text{ см}^2$ ;

Розрахунковий опір сталі 20 при зминанні  $R_{bp} = R_{un} / \gamma_m = 375 \text{ МПа}$ .

Кількість площин зрізу  $n_s = 1$ .

Сукупна мінімальна товщина деталей, що зминається:  $\Sigma t_{\min} = 3 + 3 = 6 \text{ (мм)}$ .

Кількість болтів у з'єднанні одного елемента  $n = 1$  (одноболтове). Несуча здатність одноболтового з'єднання при зсуві:

$$N_{bs} = R_{bs} \cdot A_b \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c = 320 \cdot 10^6 \cdot 1,53 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 1 = 48,96 \text{ (кН)}.$$

Несуча здатність одноболтового з'єднання при зминанні:

$$N_{bp} = R_{bp} \cdot d_b \cdot \Sigma t_{\min} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c = 375 \cdot 10^6 \cdot 14 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 1 = 31,5 \text{ (кН)}.$$

Мінімальна несуча здатність болтового з'єднання:

$$N_{b,\min} = \min \{ N_{bs}, N_{bp} \} = 31,5 \text{ кН}.$$

Умова міцності з'єднання:

$$\alpha = \frac{N_{\max} \cdot K \cdot \gamma_n}{N_{b,\min} \cdot n} = \frac{28,2 \cdot 10^6 \cdot 1,1}{31,5 \cdot 10^6 \cdot 1} = 0,99 < 1.$$

Умову міцності виконано. Міцність болтів при всіх варіантах навантажень і моделей кріплення до основи забезпечена.

### Висновки до розділу 2



В цьому розділі було виконано одне з основних наукових завдань магістерської кваліфікаційної роботи з розроблення скінчено-елементне моделювання напружено-деформовано стану геодезичного куполу під дією комплексу навантажень, на прикладі стрижневого геодезичного куполу, виготовленого фірмою ASE Myplanetarium для пересувного планетарію.

Розрахунками встановлено, що експлуатувати вільно розташований купол без анкерування до ґрунту, або, без привантаження баластом, не можна. Навіть при відносно малих значеннях вітрового впливу (менше 15 м/с) не забезпечуються умови стійкості положення, збереження форми і рівноваги куполу. Тому було розраховано на відповідні навантаження три моделі анкерування конструкції, при цьому результати показали, що кріплення за допомогою баластів малої ваги в усіх опорних точках не виконує умову жорсткості для даної конструкції. Надалі існує потреба в проведенні аналізу доцільності використання такого методу.

Окреслюючи принципи роботи каркасу і покриття стрижневих куполів, на основі проведених досліджень варто зазначити, що найслабшими елементами споруди є тентове покриття та болтові кріплення. Для всіх варіантів моделей найбільш не вигідним є тимчасовий вітровий вплив.

Враховуючи сучасні підходи до проектування, на основі проведеного моделювання, варто обрати найбільш раціональний та найбільш ефективний варіант конструювання та впровадження геодезичного куполу для пересувного планетарію.

## РОЗДІЛ 3

### АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОВЕДЕНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКІВ

#### **3.1 Урахування особливостей приєднання куполів до земної поверхні при моделюванні**

Для подальшого практичного впровадження геодезичного куполу для пересувних планетаріїв на основі отриманих результатів проведених розрахунків необхідно розробити:

- методику анкерування куполів до земної поверхні;
- методологію експлуатації з урахуванням небезпечних факторів,
- конструктивні та технологічні пропозиції з улаштування.

Оскільки розрахунками було доведено, що для експлуатації куполу його необхідно обов'язково закріпити до поверхні, тому, під час моделювання, було розглянуто три працездатних варіанти моделей приєднання каркасу споруди до основ:

- Модель 1 (адекватно відображає роботу конструкції у варіанті привантаження всіх опорних точок баластом невеликої ваги та роботу опорних конструкцій від зміщення тільки силами тертя). Загальна вага баластних елементів – 5 т, рівномірно розподілених по всіх опорних точках. Баласт (вагою близько 160 кг на опорну точку) має бути прикріплений до опорних точок. Як варіант, замість баласту можуть бути використані геошурупи, що тримають на висмикування не менше 200 кг.

- Модель 2 (адекватно відображає роботу конструкції у варіанті привантаження п'яти полярно симетричних опорних точок баластом великої ваги). Вага баласту у кожній з п'яти точок має бути не менше 4,4 т (загальна вага баласту  $5 \times 4,4 = 22$  т). Як варіант замість баласту можуть використовуватись гвинтові палі, які тримають на висмикування не менше 5 т з урахуванням сервісних коефіцієнтів.

- Модель 3 (адекватно відображає роботу конструкції у варіанті кріплення до стаціонарних фундаментів, або до жорсткої платформи). Жорсткість платформи

при цьому має бути на порядок більша жорсткості каркасу куполу. Прикладом такої платформи є жорсткий диск у вигляді залізобетонного армованого кільця зовнішнім діаметром 13,6 м, шириною 1 м та товщиною 250 мм. Як варіант допускається виготовлення платформи зі сталевих полегшених рам з привантаженням баластом. Загальна вага платформи із баластом має бути не менше 20 т.

Оцінивши результати розрахунків варто відзначити, що умови жорсткості куполу при дії експлуатаційних навантажень, для моделі 1 – не виконані (спостерігається зсув та підстрибування (хлопання) окремих опорних елементів, що заборонено нормами, але не заборонено керівництвом з експлуатації для тимчасових споруд). Тому в подальшому, варто розглядати варіант привантаження баластами малої ваги в усіх опорних точках, як найменш доцільний в конструктивному аспекті, але, все ж при виборі варіанту кріплення, необхідно зважати на умови експлуатації та проаналізувати небезпечні фактори при експлуатації куполу та експлуатаційні обмеження.

### **3.2 Небезпечні фактори при експлуатації куполу та експлуатаційні обмеження**

На основі розрахунку та потенційного способу експлуатації були встановлені такі небезпечні фактори та граничні експлуатаційні обмеження для основних несучих конструкцій (металокаркас та анкерні елементи):

- допустимі кліматичні райони:
- за вітром – 1 ... 3 (нормативна швидкість вітрового напору , або вітровий тиск 500 Па на відмітці до 5 м). Споруда має комплектуватися анемоментом.
- за снігом – 1 ... 4 (нормативний тиск 1,4 кПа);
- за ожеледдю – 1 ... 3.
- допустимий сейсмічний район – до 4.
- при прогнозованій швидкості вітру, що перевищує 20 м/с рекомендується демонтувати тентове покриття;

- температурний вплив зовнішнього середовища, за умови працюючої всередині системи мікроклімату, (температура експлуатації не нижче мінус 25 °С та не вище + 30 °С).

Експлуатація геодезичного купола за призначенням заборонена:

- в кліматичних районах, умови яких суворіші, ніж описані в розрахунках;
- за відсутності тимчасових анкерних елементів, або баласту, або жорсткої суцільної платформи, до якої металокаркас купола має бути надійно прикріплений;
- при швидкості вітру, що перевищує встановлені значення;
- поблизу дільниць, де зберігаються паливо-мастильні матеріали;
- не територіях з небезпечними природними, технологічними факторами;
- на підтоплюваній території в момент паводків;
- в момент сейсмічної активності будь-якої інтенсивності.

Забороняється встановлювати геодезичний купол на нестабільні поверхні, або поверхнях, характеристики яких можуть змінюватись з часом (трамбований сніжний покрив, крижана поверхня, мерзлий ґрунт, сипкі піски, неуцільнений високо пористий насип, тощо).

Отже під час формування технологічних пропозицій щодо улаштування конструкції необхідно враховувати усі небезпечні фактори при експлуатації куполу та експлуатаційні обмеження.

### **3.3 Конструктивні та технологічні пропозиції з улаштування геодезичних куполів для пересувних планетаріїв**

В результаті аналізу проведених розрахунків визначено основні конструктивні рішення, які слід приймати для куполів діаметром основи до 15 м.

- фундаменти – опціонально, за рішенням замовника – з фундаментом, або, без стаціонарного фундаменту на тимчасових кріпильних елементах (у 25 точках), або, привантаження опорної конструкції баластом у 5 точках. У якості фундаментів може використовуватись жорстка опорна платформа загальна вага якої розраховується по кліматичній зоні встановлення за параметром вітрового впливу;

- тимчасові кріпильні елементи на підготовленому природньому ґрунті – одновиткові гвинтові палі (або геошурупи) – 25 шт., розташованих полярно симетрично та закріплених до передбачених на опорному кільці місцях. Кількість палей (геошурупів) приймається в залежності від розрахункової швидкості вітру для конкретного будівельного майданчика згідно з керівництвом з експлуатації. Рекомендовані гвинтові палі на ґрунтах середньої міцності – 57 мм x 200 мм (діаметр витка) x 1500 мм (довжина палі) для куполів діаметром основи до 15 м;

- тимчасові кріпильні елементи на бетонній поверхні для куполів діаметром основи до 15 м – розжимні анкери M16x200 – 25 шт. (Анкер-шпилька HSA M16 x 200 35/20) , що розташовані полярно симетрично;

- несучі і огорожувальні конструкції – сферично-циліндричний купол зовнішнім діаметром до 15 м каркасно-тентової конструкції, що спирається на опорне кільце. Каркас у вигляді стрижневої системи;

- система триангуляції сферичної поверхні – п'ятикутна зірка (кількість елементів по широті, кратно 5), система полігонів – трикутники, система ребер – трубчасті стрижневі елементи на болтовому кріпленні.

В результаті скінчено-елементного моделювання (розділ 2) встановлено матеріал та марка сталі конструктивних елементів каркасу куполу, які забезпечують умови міцності та жорсткості, а, саме:

- опорне кільце – електрозварна труба перерізом близько 42 x 3 зі Сталі 20, що з'єднані шарнірно з сусідніми конструкціями та оброблені антикорозійним покриттям;

- формоутворююче кільце – електрозварна труба опорне кільце – гнучий профіль перерізом 50 x 50 x 3, що з'єднані жорстко у геометрично незмінюваний диск за допомогою кутикових кріплень зі сталі ВСт3пс4 (класу не нижче С245);

- вхідна група – з металевим опорним каркасом у вигляді електрозварних труб перерізом 50 (D) x 2 (t) зі сталі марки не нижче Сталі 20, що з'єднаний з сусідніми конструкціями куполу за допомогою спеціальних підвісів;

- інші стрижневі елементи каркасу – електрозварні труби перерізом близько 42 x 3 мм зі сталі марки не нижче Сталі 20, що з'єднані шарнірно з сусідніми

конструкціями 1 болтом М14 класу міцності 8.8. Окрайки елементів сплющені та підігнуті.

- антикорозійний захист металоконструкцій – ґрунтування цинковмісткими ґрунтівками та пофарбування емалями за два рази. Колір елементів – згідно з картою технічного дизайну;

- водостік — неорганізований, зовнішній.

Приклад реальної споруди, запроектованої за зазначеними рекомендаціями, показаний на рис. 3.1.



Рисисунок 3.1. - Загальний вигляд каркасу тривимірного проєкційного кінотеатру у вигляді геодезичного куполу фірми ASE Myplanetarium під час виготовлення. Тентове покриття змонтоване частково.

У якості майданчику при зовнішньому встановленні, врахувавши можливі способи кріплення та експлуатаційні обмеження, може використовуватись:

- опорну стаціонарну платформу з залізобетону чи металу, жорсткість якої має бути на порядок вищою за жорсткість конструкцій купола (наприклад,

залізобетонна армована фундаментна плита товщиною 250 мм, або залізобетонний армований стрічково-кільцевий фундамент шириною 1 м та товщиною 350 мм);

- майданчик зі штучним покриттям (бетонний, асфальтований, з дрібно розмірних елементів, із штучним рулонним покриттям...) із граничною нерівністю не більше 5 ... 10 мм по всій площі;

- підготовлений ґрунт природньої основи.

Найбільш не вигідним є встановлення споруди на природній ґрунт, який вирівнюють щебенево-піщаною сумішшю або відсівом. При цьому споруда має комплектуватися опорними подушками. Верхній шар підготовки – митий річковий пісок, який забезпечує площинність в межах 1 см. Допустима не горизонтальність майданчику не повинна перевищувати  $0,5^\circ$ . Діаметр кола підготовленої основи для купола становить мінімум 15 м. Опорне кільце куполу розкріплюють від зміщення (ковзання) в кожній опорній точці базового кільця, в якій встановлюється кутиковий гнучий елемент, до якого приєднують або баластні системи, або конструкції опорної платформи, або, металеві гвинтові палі (чи геошурупи), які закручують у ґрунт.

Щільність поверхневого шару основи не повинна бути меншою за 1,65 т/м<sup>3</sup>. Допускається встановлення опорного кільця куполу на вирівняний ґрунт, що покритий трав'янистими насадженнями. При цьому слід виконати викошування трави до висоти 10...60 мм (аналогічно до висоти ворсу трави на майданчиках для гольфу). При цьому, також, обов'язковим є комплектування куполу опорними подушками.

Споруда, виготовлена за цими рекомендаціями – збірно-розбірна. Орієнтовний час експлуатації на одному стаціонарному місці орієнтовно 6 місяців. Після чого споруда демонтується та перевозиться на нове місце. Технічним регламентом слід передбачити, щоб кожні 2 місяці експлуатації відбувається повна ревізія стану баласту та кріплень, які утримують опорне кільце куполу від ковзання та перекидання при дії вітрового навантаження на предмет появи дефектів (тріщин, сколів, інших механічних пошкоджень). У випадку появи таких пошкоджень відбувається ремонт або заміна пошкоджених кріпильних елементів Куполу.

Рекомендований термін експлуатації куполу (час експлуатації куполу у зібраному стані) не має перевищувати 8 років. Час роботи обмежений терміном експлуатації тентової покривної натяжної системи. Після заміни тентового покриття та детального обстеження металокаркасу, час експлуатації може бути подовжений.

### **Висновки до розділу 3**

Підводячи підсумки конструктивних та технологічних пропозицій щодо впровадження геодезичного куполу для пересувних планетаріїв, можна визначити наступні висновки:

Спосіб кріплення до земної поверхні каркасу геодезичного куполу: Важливо обрати оптимальний метод анкерування куполу, залежно від умов в яких він буде експлуатований та економічної доцільності використання обраного методу. Можливі три варіанти кріплення – геошурупами (гвинтовими палями), улаштуванням стаціонарної важкої платформи та привантаження опорних точок баластом. Враховуючи економічний аспект останній варіант є найбільш вигідний.

Регулярне обслуговування та інспекція: Проведення регулярних ревізій та обслуговування куполів допомагає вчасно виявити пошкодження на ранніх стадіях та запобігти серйозним проблемам в майбутньому.

Врахування недосконалостей геометрії купола: Для компенсації недосконалостей геометрії металевого каркасу куполу було запропоновано конструювання замкнених стрижневих контурів у вигляді круглих або полігональних обрамлень отворів вхідної групи.

Врахування екологічних аспектів: Під час улаштування та експлуатації тимчасової конструкції, якою є описаний в роботі купол, наноситься мінімальна шкода навколишньому середовищу, оскільки потреби в підготовці території не суттєві.

Додатково, необхідно враховувати економічні аспекти доцільності використання геодезичного куполу для пересувних планетаріїв в цілому та



визначити найбільш економічно доцільний спосіб кріплення до земної поверхні (розділ 4).

Враховуючи зазначені аспекти, геодезичні куполи, як легкі та ефективні системи, можуть бути впроваджені, як несуча та огорожувальна конструкція для пересувних планетаріїв, а, також, для будь-яких пересувних павільйонів без кріплення до стаціонарних фундаментів.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Для визначення найбільш економічно доцільного способу анкерування куполу в магістерській кваліфікаційній роботі було розраховано кошторисну вартість купольної конструкції з тентовим покриттям, з різними видами кріплення до земної поверхні. Локальні кошториси представлені в таблицях 4.1-4.5. Кошториси були розраховані за допомогою програмного комплексу «Будівельні Технології: Кошторис 8». Всі розрахунки були проведені відповідно до Кошторисних Норм України «Настанови визначення вартості будівництва»[29].

Локальні кошториси складені на наступні типи кріплень:

- без кріплення куполу до земної поверхні;
- закріпленого баластами в п'яти опорних точках;
- закріпленого гвинтовими палями в п'яти опорних точках;
- закріпленого геошурупами в усіх опорних точках;
- закріпленого до жорсткого диску або платформи.

Таблиця 4.1 Локальний кошториси геодезичного купола без кріплення до земної поверхні.

Будівельні Технології: Кошторис 8 Онлайн

329\_лк 02-001-001

Додаток 1  
до Настанови (пункт 3.11)

## Геокупол

(найменування об'єкта будівництва)

## Локальний кошторисний розрахунок на будівельні роботи № 02-001-001

## а Загальнобудівельні роботи

(найменування робіт та витрат, найменування будівлі, споруди, лінійного об'єкта інженерно-транспортної інфраструктури)

ОСНОВА:  
креслення(специфікації)№

Кошторисна вартість	456.439	тис. грн.
Кошторисна	0.09476	тис. люд.-
Кошторисна заробітна	8.022	тис. грн.
Середній розряд робіт	4.6	розряд

Складений в поточних цінах станом на 3 грудня 2023 р.

Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год. не зайнятих обслугову- ванням машин	
					Всього	експлуа- тації машин	Всього	заробітно ї плати	експлуа- тації машин	тих, що обслуговують машини	
										заробітно ї плати	в тому числі заробітн ої плати
					6	7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	КБ9-2-2	Монтаж каркасів арочних споруд прогоном до 48 м	1 т конструкцій	2.63	3559.45	352.76	9361	6563	928	30.7200	80.79
					2495.39	109.62			288	1.4508	3.82
	С1528-10	Труби електрозварні з корозійностійкої сталі, зовнішній діаметр 42 мм, товщина стінки 3 мм	10м	56.3	5806.53		326908				
	С1545-9	Тентове покриття ПВХ	10м2	60.0	1941.56		116494				
		<b>Разом прямих витрат по кошторису</b>					452763	6563	928		80.79
									288		3.82
		Разом прямі витрати				грн.	452763				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів і комплектів				грн.	445272				
		вартість ЕММ				грн.	928				
		в т.ч. заробітна плата в ЕММ				грн.		288			
		заробітна плата робітників				грн.		6563			
		всього заробітна плата				грн.		6851			
		Загальновиробничі витрати				грн.	3676				
		трудоємність в загальновиробничих витратах				люд-г					10.15
		заробітна плата в загальновиробничих витратах				грн.		1171			
		<b>Всього по кошторису</b>				грн.	456439				
		Кошторисна трудоємність				люд-г					94.76
		Кошторисна заробітна плата				грн.		8022			



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	КБ9-2-2	Монтаж каркасів арочних споруд прогоном до 48 м	1 т конструкцій	2.63	3559.45	352.76	9361	6563	928	30.7200	80.79
					2495.39	109.62			288	1.4508	3.82
	C1528-10	Труби електрозварні з корозійностійкої сталі, зовнішній діаметр 42 мм, товщина стінки 3 мм	10м	56.3	5806.53		326908				
	C1545-9	Тентове покриття ПВХ	10м2	60.0	1941.56		116494				
	C1411-25	Блоки та плити фундаментні розміром менше 3х3 м ребристі, коробчасті, об'єм більше 1 до 4 м3, маса до 5 т, клас бетону В15	м3	20.0	5756.85		115137				
		<b>Разом прямих витрат по кошторису</b>					567900	6563	928		80.79
									288		3.82
		Разом прямі витрати				грн.	567900				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів і комплектів				грн.	560409				
		вартість ЕММ				грн.	928				
		в т.ч. заробітна плата в ЕММ				грн.		288			
		заробітна плата робітників				грн.		6563			
		всього заробітна плата				грн.		6851			
		Загальновиробничі витрати				грн.	3676				
		трудоємність в загальновиробничих витратах				люд-г					10.15
		заробітна плата в загальновиробничих витратах				грн.		1171			
		<b>Всього по кошторису</b>				грн.	571576				
		Кошторисна трудоємність				люд-г					94.76
		Кошторисна заробітна плата				грн.		8022			

Таблиця 4.3 Локальний кошториси геодезичного купола закріпленого гвинтовими палями в п'яти опорних точках.

Будівельні Технології: Кошторис 8 Онлайн

329\_лк 02-001-001

Додаток 1  
до Настанови (пункт 3.11)

## Геокупол

(найменування об'єкта будівництва)

## Локальний кошторисний розрахунок на будівельні роботи № 02-001-001

а Загальнобудівельні роботи

(найменування робіт та витрат, найменування будівлі, споруди, лінійного об'єкта інженерно-транспортної інфраструктури)

ОСНОВА:  
креслення(специфікації)№

Кошторисна вартість	2725.151	тис. грн.
Кошторисна	5.18438	тис. люд.-
Кошторисна заробітна	390.349	тис. грн.
Середній розряд робіт	3.5	розряд

Складений в поточних цінах станом на 3 грудня 2023 р.

Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год. не зайнятих обслугову- ванням машин	
					Всього	експлуа- тації машин	Всього	заробітно ї плати	експлуа- тації машин	тих, що обслуговують машини	
										заробітно ї плати	в тому числі заробітн ої плати
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
КБ9-2-2	Монтаж каркасів арочних споруд прогоном до 48 м	1 т конструкцій	2.63	3559.45	352.76	9361	6563	928	30.7200	80.79
				2495.39	109.62			288	1.4508	3.82
C1528-10	Труби електрозварні з корозійностійкої сталі, зовнішній діаметр 42 мм, товщина стінки 3 мм	10м	56.3	5806.53		326908				
C1545-9	Тентове покриття ПВХ	10м2	60.0	1941.56		116494				
КБ6-11-2	Установлення гвинтових паль	1 т	20.0	104131.33	263.99	2082627	318237	5280	226.6000	4532.00
				15911.85	58.85			1177	0.6150	12.30
<b>Разом прямих витрат по кошторису</b>						2535390	324800	6208		4612.79
								1465		16.12
Разом прямі витрати					грн.	2535390				
в тому числі:										
вартість матеріалів, виробів і комплектів					грн.	2204382				
вартість ЕММ					грн.	6208				
в т.ч. заробітна плата в ЕММ					грн.		1465			
заробітна плата робітників					грн.		324800			
всього заробітна плата					грн.		326265			
Загальновиробничі витрати					грн.	189761				
трудоємність в загальновиробничих витратах					люд-г					555.47
заробітна плата в загальновиробничих витратах					грн.		64084			



Таблиця 4.4 Локальний кошториси геодезичного купола закріпленого геошурупами в усіх опорних точках.

Будівельні Технології: Кошторис 8 Онлайн

329\_лк 02-001-001

Додаток 1  
до Настанови (пункт 3.11)

## Геокупол

(найменування об'єкта будівництва)

## Локальний кошторисний розрахунок на будівельні роботи № 02-001-001

а				Загальнобудівельні роботи			
				(найменування робіт та витрат, найменування будівлі, споруди, лінійного об'єкта інженерно-транспортної інфраструктури)			
ОСНОВА: креслення(специфікації)№	КОШТОРИСНА ВАРТІСТЬ			6128.216	тис. грн.		
	КОШТОРИСНА ЗАРОБІТНА			12.81880	тис. люд.-		
	КОШТОРИСНА ЗАРОБІТНА			963.841	тис. грн.		
	СЕРЕДНІЙ РОЗРЯД РОБІТ			3.5	розряд		

Складений в поточних цінах станом на 3 грудня 2023 р.

Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год. не зайнятих обслугову- ванням машин	
					Всього	експлуа- тації машин	Всього	заробітно ї плати	експлуа- тації машин	тих, що обслуговують машини	
										заробітно ї плати	в тому числі заробітн ої плати
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	КБ9-2-2	Монтаж каркасів арочних споруд прогоном до 48 м	1 т конструкцій	2.63	3559.45	352.76	9361	6563	928	30.7200	80.79
					2495.39	109.62			288	1.4508	3.82
	С1528-10	Труби електрозварні з корозійностійкої сталі, зовнішній діаметр 42 мм, товщина стінки 3 мм	10м	56.3	5806.53		326908				
	С1545-9	Тентове покриття ПВХ	10м2	60.0	1941.56		116494				
	КБ6-11-2	Установлення гвинтових паль	1 т	50.0	104131.33	263.99	5206566	795593	13200	226.6000	11330.00
					15911.85	58.85			2943	0.6150	30.75
		<b>Разом прямих витрат по кошторису</b>					5659329	802156	14128		11410.79
									3231		34.57
		Разом прямі витрати				грн.	5659329				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів і комплектів				грн.	4843045				
		вартість ЕММ				грн.	14128				
		в т.ч. заробітна плата в ЕММ				грн.		3231			
		заробітна плата робітників				грн.		802156			
		всього заробітна плата				грн.		805387			
		Загальновиробничі витрати				грн.	468887				
		трудоємність в загальновиробничих витратах				люд-г					1373.44
		заробітна плата в загальновиробничих витратах				грн.		158454			
		<b>Всього по кошторису</b>				грн.	6128216				
		Кошторисна трудоємність				люд-г					12818.80
		Кошторисна заробітна плата				грн.		963841			

Таблиця 4.5 Локальний кошториси геодезичного купола закріпленого до жорсткого диску або платформи.

Будівельні Технології: Кошторис 8 Онлайн

329\_лк 02-001-001

Додаток 1  
до Настанови (пункт 3.11)

## Геокупол

(найменування об'єкта будівництва)

## Локальний кошторисний розрахунок на будівельні роботи № 02-001-001

## а Загальнобудівельні роботи

(найменування робіт та витрат, найменування будівлі, споруди, лінійного об'єкта інженерно-транспортної інфраструктури)

ОСНОВА:  
креслення(специфікації)№

Кошторисна вартість	1109.318	тис. грн.
Кошторисна	1.22135	тис. люд.-
Кошторисна заробітна	97.943	тис. грн.
Середній розряд робіт	4.0	розряд

Складений в поточних цінах станом на 3 грудня 2023 р.

Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількіст ь	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год. не зайнятих обслуговуванням машин	
					Всього	експлуа- тації машин	Всього	заробітн ої плати	експлуа- тації машин	тих, що обслуговують машини	
										заробітн ої плати	в тому числі заробітн ої плати
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
КБ9-2-2	Монтаж каркасів арочних споруд прогоном до 48 м	1 т конструкцій	2.63	3559.45	352.76	9361	6563	928	30.7200	80.79	
				2495.39	109.62			288	1.4508	3.82	
C1528-10	Труби електрозварні з корозійностійкої сталі, зовнішній діаметр 42 мм, товщина стінки 3 мм	10м	56.3	5806.53		326908					
C1545-9	Тентове покриття ПВХ	10м2	60.0	1941.56		116494					
КБ29-199-1	Улаштування монолітних залізобетонних фундаментних прогонів площею перерізу до 2 м2	100м3 бетону в конструкції	1.57	380400.03	2568.81	597228	66465	4033	575.1200	902.94	
				42334.58	2252.16			3536	32.4762	50.99	
<b>Разом прямих витрат по кошторису</b>						1049991	73028	4961		983.73	
								3824		54.81	
Разом прямі витрати						грн.	1049991				
в тому числі:											
вартість матеріалів, виробів і комплектів						грн.	972002				
вартість ЕММ						грн.	4961				
в т.ч. заробітна плата в ЕММ						грн.		3824			
заробітна плата робітників						грн.		73028			
всього заробітна плата						грн.		76852			
Загальновиробничі витрати						грн.	59327				
трудоємність в загальновиробничих витратах						люод-г					182.81

## Висновки до розділу 4

Оцінивши кошторисну вартість різних типів кріплень геодезичного куполу до земної поверхні було достеменно визначено, що кріплення баластами в п'яти опорних точках є найбільш економічно доцільний варіант. Аналіз кошторисної вартості представлений в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – результати аналізу кошторисної вартості різних видів анкерування геодезичного куполу.

Тип кріплення	Кошторисна вартість, тис.грн.	Кошторисна трудомісткість тис.люд.год.	Кошторисна заробітна плата Тис.грн
Баласты в п'яти опорних точках	571.576	0,09476	8,022
Гвинтові палі в п'яти опорних точках	2725.151	5,18438	390,349
Геошурупи в усіх опорних точках	6128.216	12,8188	963,841
Жорсткий диск (платформа)	1109.318	1.22135	97.943

Отже найраціональніший варіант - це закріплення баластами в п'яти опорних точках, як з конструктивної точки зору, так і з економічної.

## ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі доведено, що дослідження поведінки геодезичних стрижневих куполів під дією різноманітних навантажень та вивчення можливості впровадження цих конструкцій для пересувних планетаріїв є актуальною темою сучасного будівництва. У даній роботі було визначено найбільш напружені і небезпечні місця конструкції геодезичного купола, виконаної з сталевих труб, з'єднаних між собою болтовими з'єднаннями та покритої тентовим покриттям. Досліджено і запропоновано методики кріплення конструкції каркасу до земної поверхні, визначено недоліки та позитивні аспекти кожного із запропонованих методів, зокрема економічний ефект та доцільність.

Досягнуто наступних наукових результатів.

1. У даній магістерській роботі були розглянуті та виконані комплекс наукових задач, пов'язаних з дослідженням та розвитком використання геодезичних куполів як самостійних споруд, зокрема тимчасових. Здійснений аналіз сучасних вимог технічних нормативних документів та стандартів дозволив визначити основні вимоги до проектування, виготовлення та експлуатації таких будівель.

2. Вивчено небезпечні фактори під час експлуатації, якими виявилися встановлення споруди на хитких нестабільних основах та експлуатація споруди при ураганному вітрі.

3. Встановлено експлуатаційні обмеження для подібних споруд (гранична швидкість вітру, допустимий район за сейсмічністю, граничне навантаження від ожеледі). Це дозволило розробити оптимальні умови для експлуатації геодезичних куполів з тентовим покриттям як тимчасових споруд. Для купольних споруд з каркасом у вигляді геодезичної стрижневої системи діаметром до 15 м допустимий вітровий та ожеледний кліматичний райони – 3, за ожеледдю – 4.

4. Розроблено аналітичні та скінчено-елементні моделі напружено-деформованого стану конструкцій геодезичного купола, які враховують їх сумісну роботу з тентовим покриттям та ґрунтом основи. Це забезпечило можливість

прогнозування їх поведінки під навантаженням та виявило можливі проблемні зони, а також виявило оптимальні варіанти кріплення до земної поверхні (привантаження баластом п'яти полярно симетричних опорних точок куполу). Це сприяло конструюванню раціональної та ефективної моделі куполу.

5. Результати виконаних досліджень можуть бути використані в інженерній практиці при проектуванні та будівництві тимчасових споруд купольного типу.

Важливо враховувати експлуатаційні обмеження та можливі небезпечні чинники під час експлуатації, що можуть впливати на стійкість конструкції. Одним із основних таких факторів є понаднормове вітрове навантаження. Отримані результати досліджень можуть допомогти інженерам та конструкторам визначити оптимальні розміри та параметри геодезичних куполів, що забезпечать їх ефективність та безпеку під час застосування такої конструкції для тимчасових споруд. Таким чином, моделювання напружено-деформованого стану конструкції має визначне значення для практичного впровадження, оскільки таке моделювання дозволяє чітко визначити слабкі сторони конструкції та її роботу під навантаженням, а знаючи слабкі сторони можливо запобігти деформації або руйнуванню конструкції в цілому та її елементів зокрема.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Popov V. Connector of polycarbonate dome frameless structure / V. Popov, Wei Wang // China building decoration. №12, 03.2023. P. 330 - 331. URL: <http://www.qikan.com.cn/newarticleinfo/dzqy20224762.html>
2. 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.
3. Гнідець Б.Г., Гнідець Р.Б. Збірно-монолітні тришарові куполи і склепіння, монтовані навісним методом // Будівельні конструкції: Зб. наук. пр. – К., 2003. – Вип. 59. – С. 88–92.
4. Гнідець Б.Г, Ліщинський Р.І., Гнідець Р.Б. Застосування збірно-монолітного кесонного перекриття на будівництві церкви Св. Володимира й Ольги в м. Львові // Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 1995. – № 27. – С. 23–28.
5. Баранецька О. С. Раціональні геодезичні стрижневі купольні системи для пересувних планетаріїв [Електронний ресурс] / В. О. Попов, О. С. Баранецька // Матеріали ІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ : Збірник доповідей, Вінниця, 14-23 березня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. С. 1480 – 1484. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/18983>
6. Баранецька О. С. Моделювання напружено-деформованого стану металевого стрижневого каркасу геодезичного куполу для раціонального проектування / В. О. Попов, А. В. Попова, О. С. Баранецька // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2023-2. С. 5 – 19.
7. Баранецька О. С. Дослідження напружено-деформованого стану металевого каркасу геодезичного стрижневого куполу під дією вітрового навантаження [Електронний ресурс] / В. О. Попов, О. С. Баранецька // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність в



галузях економіки України-2023», м. Вінниця, 20-24 листопада 2023 р. : електронне мережне наукове видання. – Електрон. текст. дані. – 2023. – С. 35–43.

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.1.2-2-2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Введ. З 1 січня 2007 р. на заміну СНиП 2.01.07-85 (крім розділу 10). К.: Мінбуд України, 2006. – 71 с.

10. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Національні стандарти України).

11. ДБН В.2.6-220:2017. Покриття будівель і споруд. [Чинний від 2018-01-01]. – К.: Мінрегіон України, 2017. – 43 с. – (Національні стандарти України).

12. ДБН В.2.1-10-2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. - [Чинний від 2019-01-01]. – К.: Мінрегіон України, 2018. – 161 с. – (Державні будівельні норми України).

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

14. Пермяков В.О., Нілов О.О., Шимановські О.В., Белов І.Д. та ін. Металеві конструкції: Підручник / Під загальною редакцією В.О. Пермякова та О.В. Шимановського. – К.: Видавництво «Сталь», 2008. – 812 с.

15. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія / Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с.

16. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування / Мінбуд України. – К., 2006. – 10 с.

17. Основи та фундаменти споруд: ДБН В.2.1-10-2009 зі зміною №1 та №2. - [Чинний від 2012-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 161 с. – (Національні стандарти України).

18. 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.
19. Попов В.О., Кондратенко І.П., Ращепкін А.П. Безфундаментні башти-атракціони з високоточним стовбуром. Монографія – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 250 с.
20. EN 1993-4-1. Design of steel structures: Eurocode 3. – [Effective from 2006-12-06]. – Brussels: European committee for standardization, 2007. 117 p. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.4.1.2007.pdf>
21. Chen L. Buckling of cylindrical shells with stepwise variable wall thickness under uniform external pressure / L. Chen, J. M. Rotter, C. Doerich // Engineering Structures. – ELSEVIER, 2011. – Vol. 3., №12. P. 3570 – 3578.
22. Kun S. N. Structural mechanics of shells / S. N. Kun. – Moskow, USSR : Publishing house of Mechanical engineering, 1966. 508 p.
23. Chen Shen. Interpolating and Approximating Implicit Surfaces from Polygon Soup / Shen Chen, James F. O'Brien, R. Jonathan Shewchuk // University of California, Berkeley USA – Electronic text data – 2004. URL: <http://graphics.berkeley.edu/papers/Shen-IAI-2004-08/Shen-IAI-2004-08.pdf>
24. Triangulation and Interpolation on the Surface of a Sphere. WaveMetrics – Electronic text data – 2022. URL: <https://www.wavemetrics.com/news/triangulation-and-interpolation-surface-sphere>
25. DIN 964. Deutsche norm (German standard). Data sheet of screws made of stainless steel. – Electronic text data – URL: <https://www.aramfix.com/content/files/d964caill/datasheet%20din%20964.pdf>
26. DIN 965. Deutsche norm (German standard). Metric screws made of stainless steel for machinery. Data sheet. – Electronic text data – URL: <http://gost.com.ua/up/catalog/file/din-965-perevod.pdf>

27. DIN 966. Deutsche norm (German standard). Metric DIN 966 Oval Head Phillips Machine Screws. Data sheet. – Electronic text data – URL: [https://www.aspenfasteners.com/content/pdf/Metric\\_DIN\\_966\\_spec.pdf](https://www.aspenfasteners.com/content/pdf/Metric_DIN_966_spec.pdf)
28. ISO 7380-1:2011. International standard. Hexagon socket button head screws – Electronic text data – 2011. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/53671/84df01c5fcce4a91896ac3b0c55ca128/ISO-7380-1-2011.pdf>
29. Кошторисні норми України. Настанова з визначення вартості будівництва. – URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=96362](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96362)
30. Fuller R. B. Geodesic dome // *Perspecta*. 1952, no. 1, pp. 30–33
31. Yue Guan, Lawrence N. Virgin, Daniel Helm, Structural behavior of shallow geodesic lattice domes, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 155, 2018, Pages 225-239, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.07.022>.
32. xu, Ying & Han, Qing-Hua & Parke, G.A.R. & Liu, Y.-M. (2017). Experimental Study and Numerical Simulation of the Progressive Collapse Resistance of Single-Layer Latticed Domes. *Journal of Structural Engineering (United States)*. 143. 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001868.
33. Коломійчук Г.П. Стійкість металевих однопоясних сітчастих куполів з початковими недосконалостями / Г.П. Коломійчук // *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. – Одеса: ОДАБА, 2019. – Випуск №23. – С. 42-50, doi:10.31650/2707-3068-2019-23-42-50.
34. Zabojszcza, Paweł & Radoń, Urszula. (2019). The Impact of Node Location Imperfections on the Reliability of Single-Layer Steel Domes. *Applied Sciences*. 9. 2742. 10.3390/app9132742.
35. Fiammetta Venuti, Luca Bruno, Influence of in-plane and out-of-plane stiffness on the stability of free-edge gridshells: A parametric analysis, *Thin-Walled Structures*, Volume 131, 2018, Pages 755-768, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.019>.



## Додаток Б Відомість аркушів графічної частини

Аркуш	Найменування	Примітки
1	Назва магістерської кваліфікаційної роботи	Плакат 1
2	Мета, об'єкт, предмет магістерської кваліфікаційної роботи	Плакат 2
3	Наукові задачі магістерської кваліфікаційної роботи	Плакат 3
4	Новизна магістерської кваліфікаційної роботи	Плакат 4
5	Апробацій результатів, публікації магістерської кваліфікаційної роботи	Плакат 5
6	Актуальність досліджень магістерської кваліфікаційної роботи	Плакат 6
7	Приклади існуючих купольних систем. "Зал сторіччя". Польща, м Вроцлав, 1911-1913 рр., арх. М. Берг, інж. Г. Трауер.	Плакат 7
8	Приклади існуючих купольних систем. Геодезичний стрижневий купол «Диво Єни».	Плакат 8
9	Приклади існуючих купольних систем. Сітчаста оболонка покриття, купол спортивної споруди. США, м Такома, 1983 р. Фрагмент кружальної-сітчастого зводу з болтовими кріпленнями в вузлах. Фрагмент ребристо-кільцевого купола.	Плакат 9
10	Приклади існуючих купольних систем. Купольний готель з геодезичних систем в Яремче	Плакат 10
11	Каркас геодезичного куполу	Плакат 11
12	Моделювання напружено-деформованого стану. Скінчено-елементна модель каркасу та елементи каркасу геодезичного куполу	Плакат 12
13	Раціональна схема анкерування опорного кільця	Плакат 13
14	Схема прикладання кліматичних впливів	Плакат 14
15	Напружено-деформований стан геодезичного куполу при вітровому впливі. Осьові сили у елементах каркасу. Напруження у тентовому покритті. Перша форма втрати стійкості	Плакат 15
16	Прогнозований характер роботи споруди для варіанта приєднання моделі у п'яти ключових точках, за можливими граничними станами	Плакат 16
17	Економічна частина. Результати аналізу кошторисної вартості різних видів анкерування геодезичного куполу	Плакат 17
18	Економічний аналіз типів анкерування геодезичного куполу.	Плакат 18
19	Висновки до магістерської кваліфікаційної роботи	Плакат 19



ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ  
РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ  
ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Геодезичні стрижневі куполи

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)


Підрозділ кафедра БМГА, ФБЦЕІ  
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

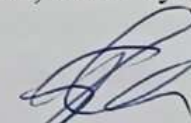
Оригінальність 100 % Схожість 0 %


Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку  Блащук Н.В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи  Баранецька О.С.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи  Попов В.О.  
(підпис) (прізвище, ініціали)



**Вінницький національний технічний університет**

# **«ГЕОДЕЗИЧНІ СТРИЖНЕВІ КУПОЛИ»**

**Виконав:**

**Магістрант кафедри БМГА, студентка 2-го курсу, групи 2Б-22м,  
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія**

**О.С. Баранецька**

**Керівник:**

**к.т.н., доцент В.О.Попов**



- **Метою** магістерської роботи є розробка раціональних конструктивних форм геодезичних куполів та їх несучих конструкцій для пересувних споруд з урахуванням різних способів кріплення до земної поверхні.
- **Об'єктом** є перерозподіл внутрішніх зусиль і напружень між елементами каркасу геодезичних куполів з урахуванням його спільної роботи з основою.
- **Предметом** дослідження є напружено-деформований стан геодезичних стрижневих куполів під дією комплексу кліматичних та технологічних навантажень.

## Наукові задачі:

- ❖ *визначення області застосування куполів з металу, бетону та дерева, загалом, та геодезичних стрижневих куполів, зокрема;*
- ❖ *аналіз стану питання з проектування сферичних оболонок (куполів);*
- ❖ *аналіз основних конструктивних елементи куполів, загалом, та геодезичних стрижневих куполів, зокрема та огляд можливих способів кріплення до земної поверхні;*
- ❖ *скінчено-елементне моделювання напружено-деформовано стану геодезичних куполів під дією комплексу навантажень, окреслення принципів роботи каркасу і покриття стрижневих куполів;*
- ❖ *аналіз найбільш небезпечних с точки зору міцності та стійкості ділянок і конструкцій куполів;*
- ❖ *впровадження застосування геодезичних куполів для пересувних планетаріїв.*

## НОВИЗНА:

- ✓ змодельовано напружено-деформований стан геодезичних куполів зі сталевим трубчастим каркасом з урахуванням спільної роботи тентового покриття та каркасу та різних способів приєднання каркасів куполів до основи;
- ✓ запропоновано декілька раціональних варіантів кріплення такої будівлі до земної поверхні без використання класичних стаціонарних фундаментів, що надає конструкції мобільності.

## Апробація результатів магістерської роботи:

Результати магістерської роботи доповідалися на двох наукових конференціях:

1. ІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, яка відбулася у Вінниця, 14-23 березня 2023 р.
2. Міжнародній фаховій конференції «Енергоефективність в галузях економіки України-2023», м. Вінниця, 20-24 листопада 2023 р.

## Публікації:

За матеріалами магістерської роботи опубліковано три наукові роботи, одна з яких – у фаховому виданні України:

1. Баранецька О. С. Раціональні геодезичні стрижневі купольні системи для пересувних планетаріїв [Електронний ресурс] / В. О. Попов, О. С. Баранецька // Матеріали ІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ : Збірник доповідей, Вінниця, 14-23 березня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. С. 1480 – 1484. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/18983>
2. Баранецька О. С. Моделювання напружено-деформованого стану металевого стрижневого каркасу геодезичного куполу для раціонального проектування / В. О. Попов, А. В. Попова, О. С. Баранецька // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2023-2. С. 5 – 19.
3. Баранецька О. С. Дослідження напружено-деформованого стану металевого каркасу геодезичного стрижневого куполу під дією вітрового навантаження [Електронний ресурс] / В. О. Попов, О. С. Баранецька // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність в галузях економіки України-2023», м. Вінниця, 20-24 листопада 2023 р. : електронне мережне наукове видання. – Електрон. текст. дані. – 2023. – С. 35–43.
4. Ще одна стаття подана до опублікування.

## АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕНЬ:

- на сьогодні не достатньо досліджені конструктивні питання надійного тимчасового приєднання купольних систем до поверхні землі
- відсутній достовірний опис розподілу внутрішніх зусиль у елементах каркасно-стрижневих систем в залежності від обраного способу анкерування до поверхні, впливи кліматичних навантажень на тентове покриття
- не у всій повноті визначено способи підвищення довговічності та не описана методика вдосконалення геодезичних стрижневих куполів

**Приклади існуючих купольних систем**  
**"Зал сторіччя". Польща, м Вроцлав, 1911-1913 рр., арх. М. Берг,  
інж. Г. Трауер**



Приклади існуючих купольних систем  
Геодезичний стрижневий купол «Диво Єни»

8



## Приклади існуючих купольних систем

Сітчаста оболонка покриття, купол спортивної споруди.

США, м Такома, 1983 р



Фрагмент кружальної-сітчастого зводу з болтовими кріпленнями в вузлах



Фрагмент ребристо-кільцевого купола

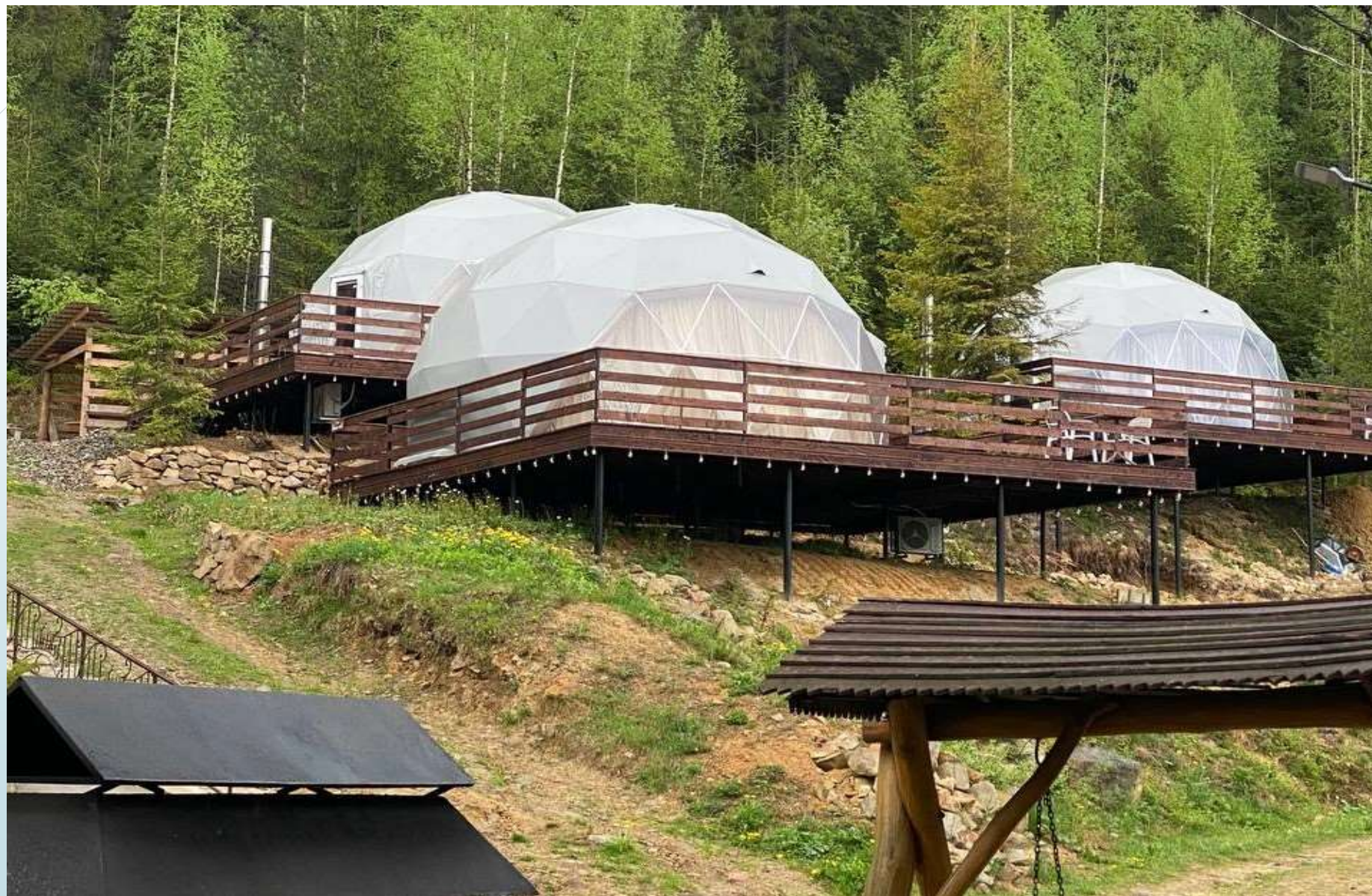




# Приклади існуючих купольних систем

Купольний готель з геодезичних систем в Яремче

10



# КАРКАС ГЕОДЕЗИЧНОГО КУПОЛУ

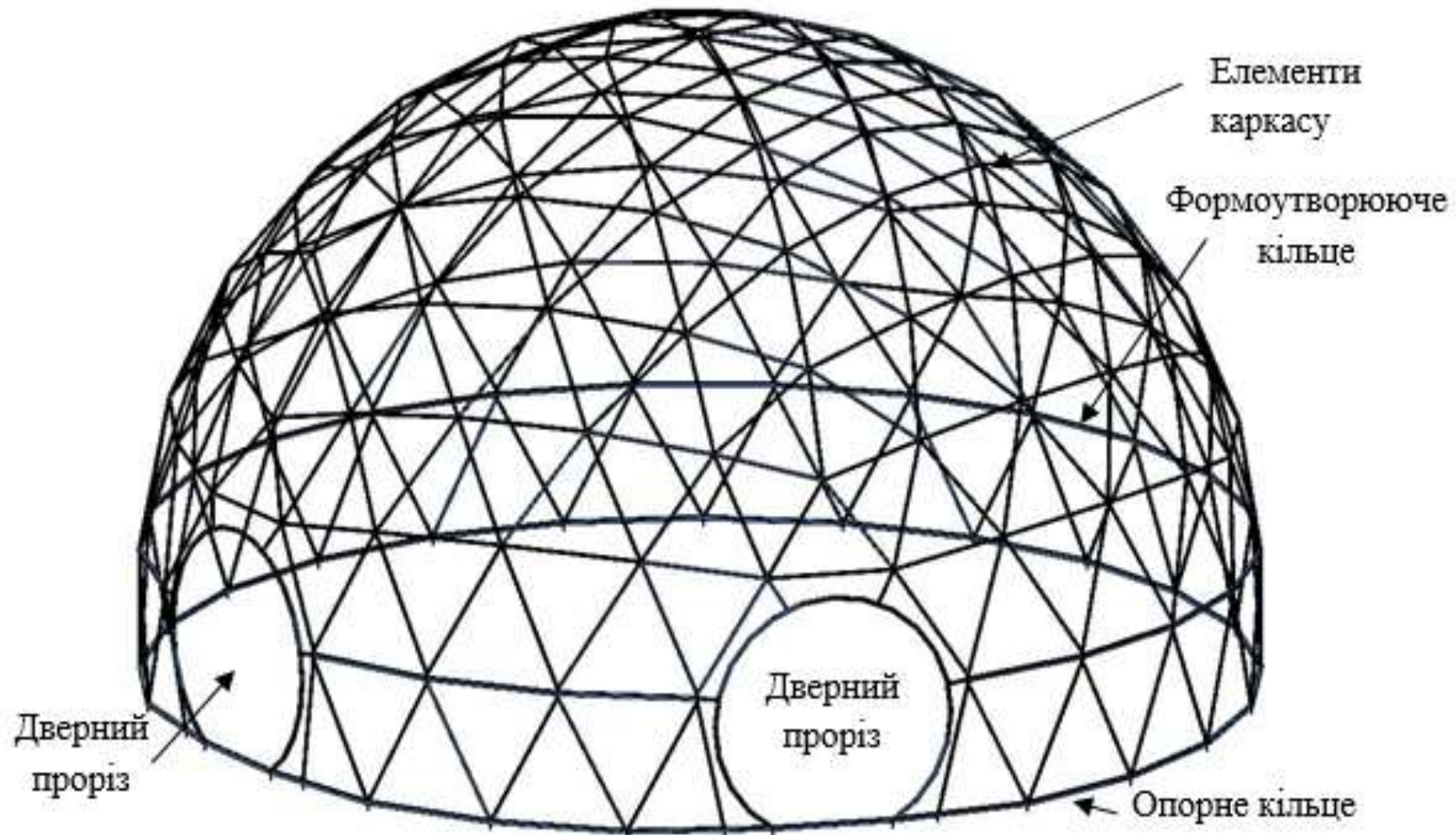
11



# МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

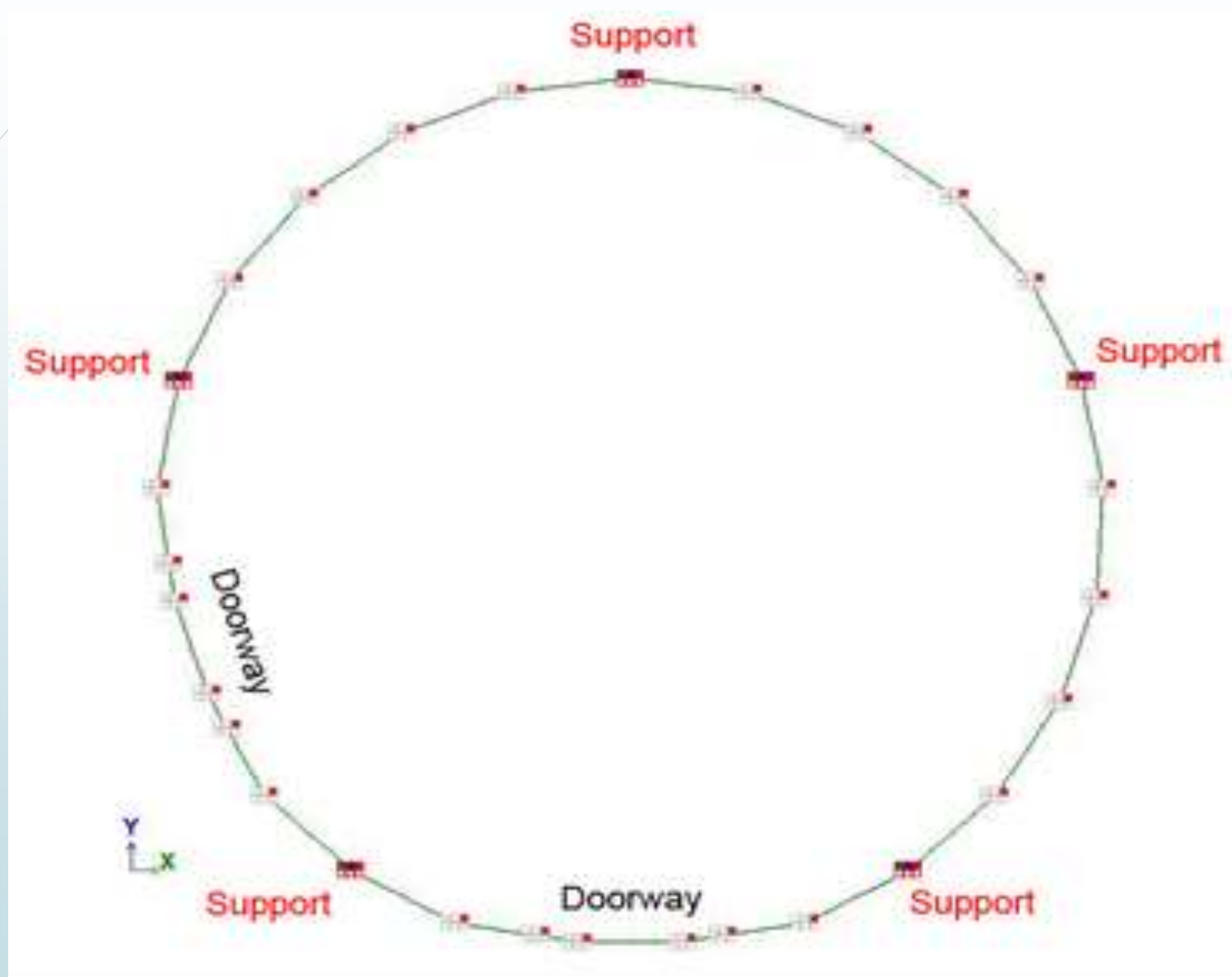
12

## Скінчено-елементна модель каркасу та елементи каркасу куполу геодезичного куполу



# РАЦІОНАЛЬНА СХЕМА АНКЕРУВАННЯ ОПОРНОГО КІЛЬЦЯ

13

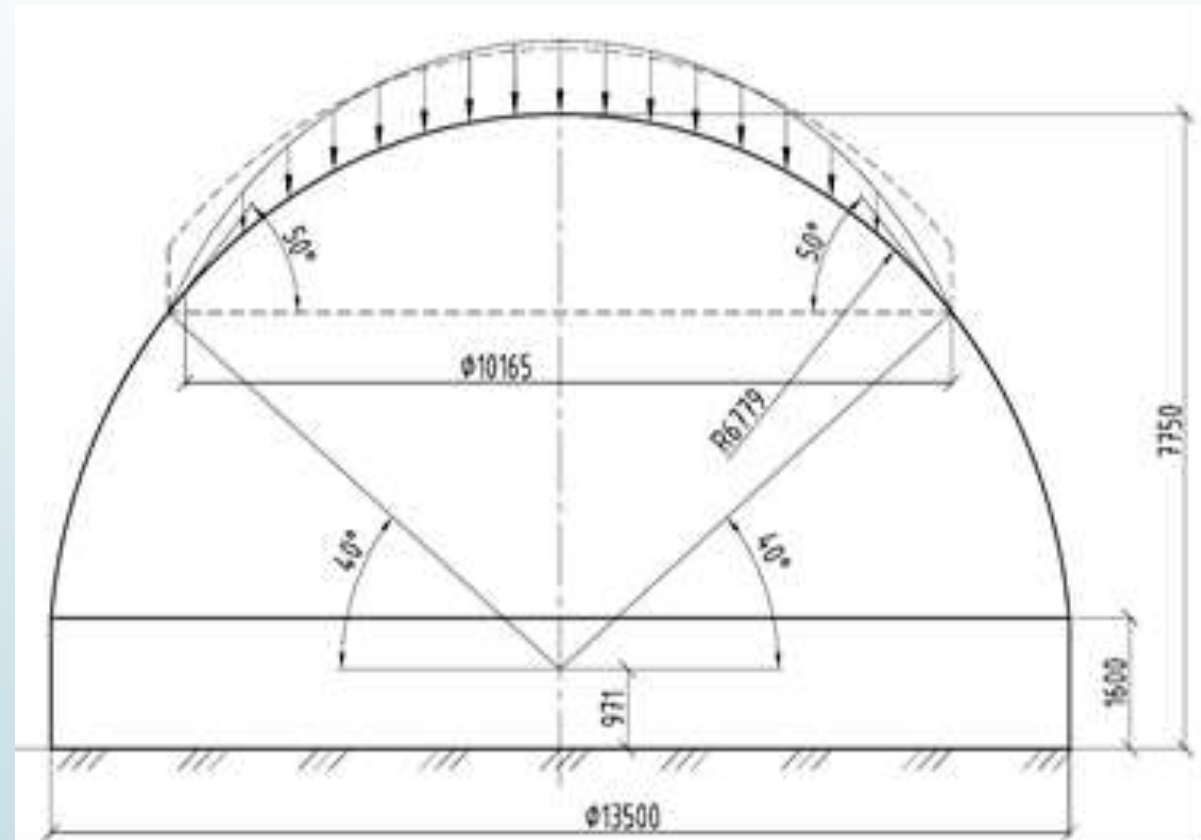
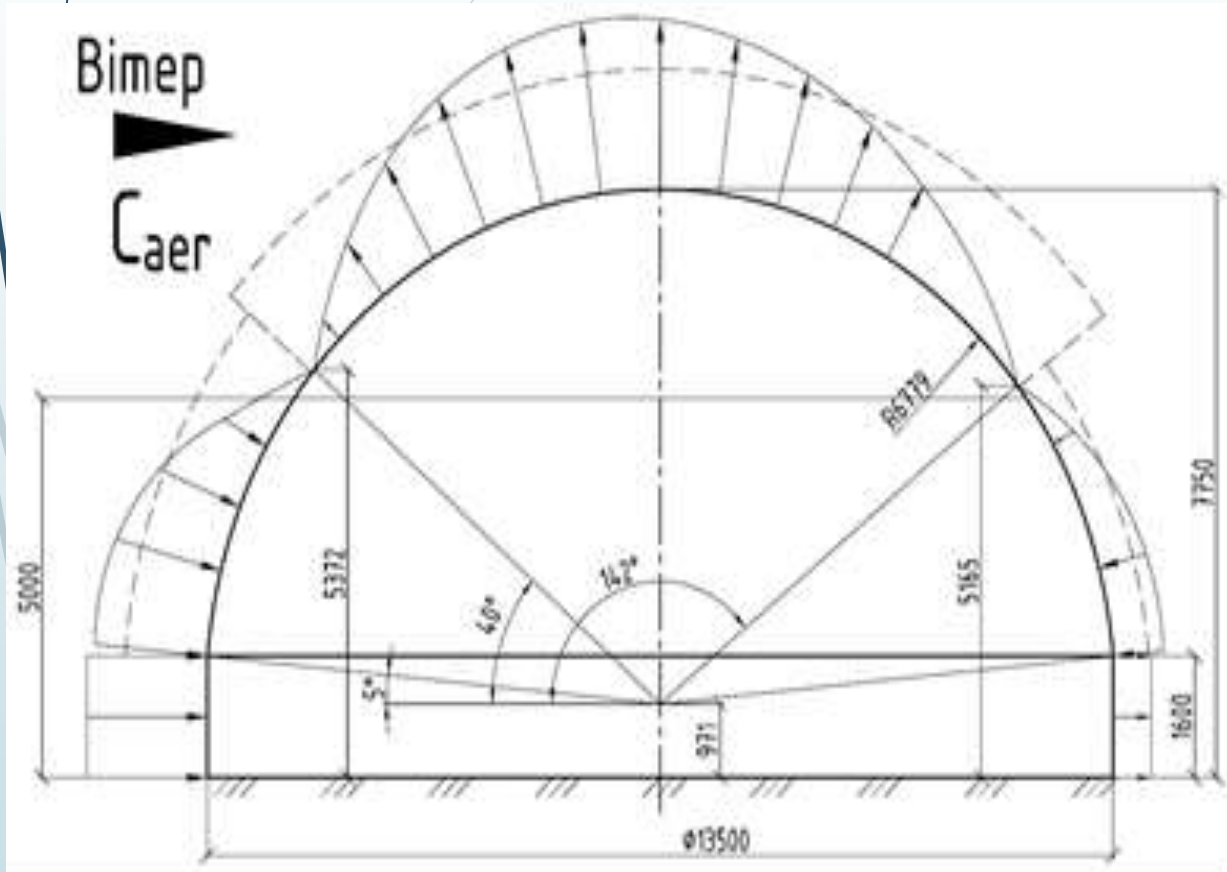


# СХЕМА ПРИКЛАДАННЯ КЛІМАТИЧНИХ ВПЛИВІВ

14

Вітер

Сніг

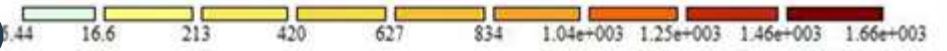
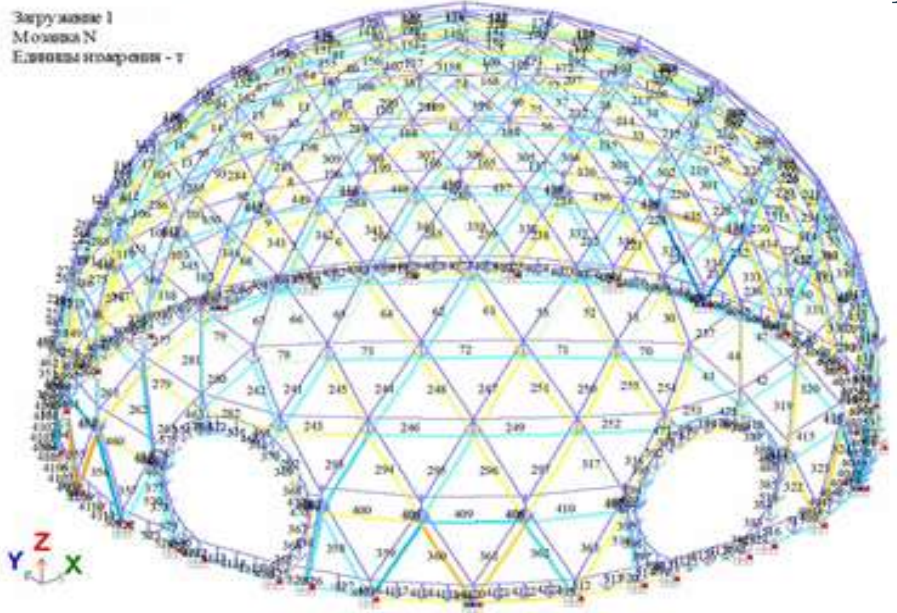


# НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН

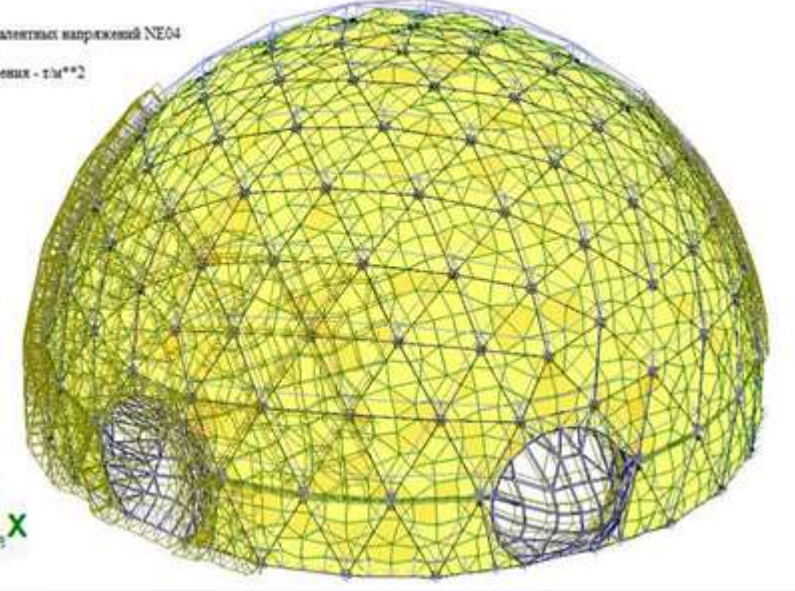
## ГЕОДЕЗИЧНОГО КУПОЛУ ПРИ ВІТРОВОМУ ВПЛИВІ



Завантаження 1  
Мозаика N  
Елементи каркаса - T

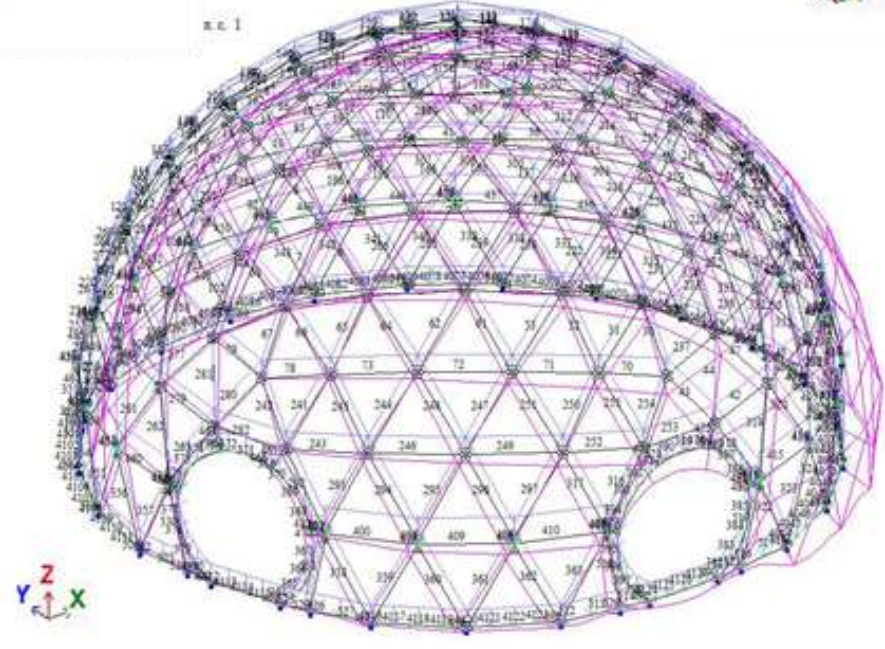


ДІТЕРА  
Завантаження 1  
Мозаика еквівалентна напруженій NE04  
Средний слой  
Елементы измерения - t/m\*\*2

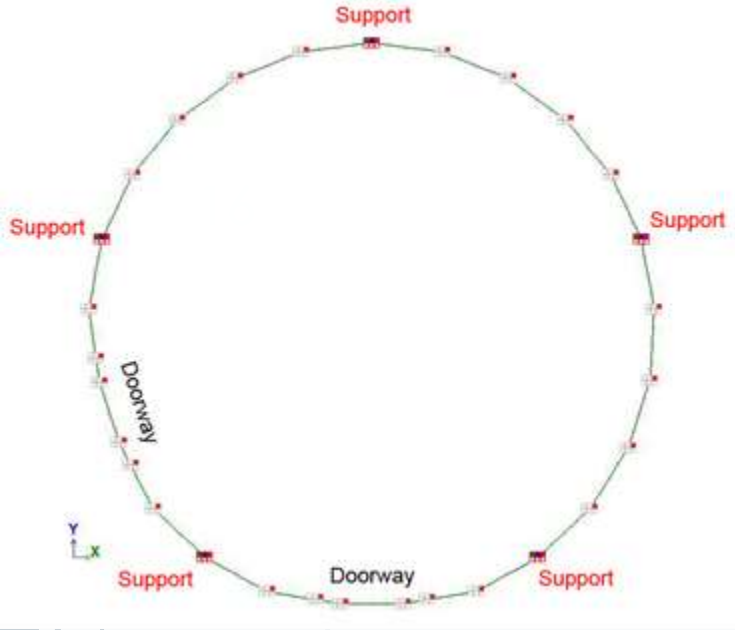


Осьові сили у елементах  
каркасу

Напруження у тентовому  
покритті



Перша форма втрати  
стійкості



Прогнозований характер роботи споруди для варіанта приєднання моделі у п'яти ключових точках, за можливими граничними станами:

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

## Економічна частина

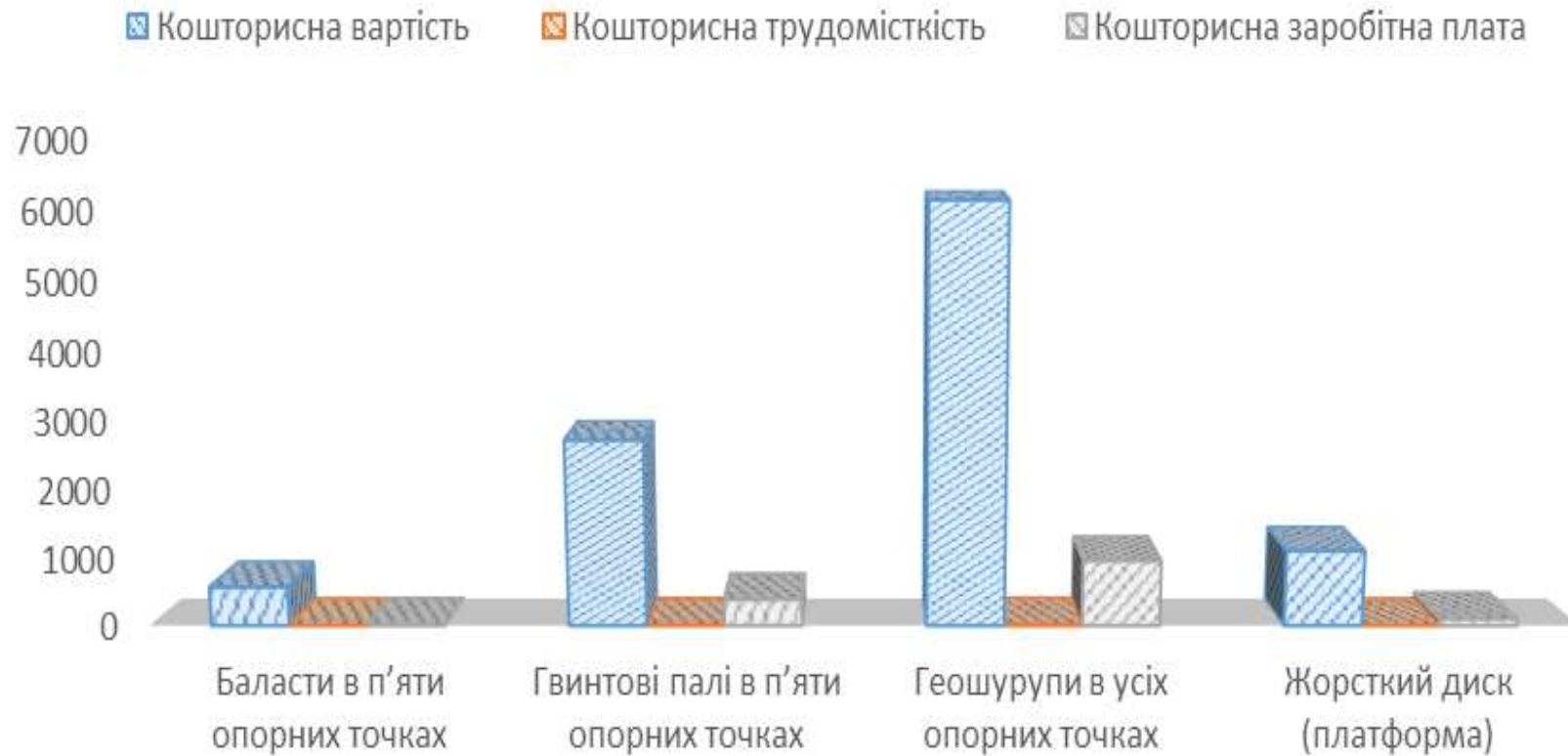
17

### Результати аналізу кошторисної вартості різних видів анкерування геодезичного куполу

Тип кріплення	Кошторисна вартість, тис.грн.	Кошторисна трудомісткість тис.люд.год.	Кошторисна заробітна плата Тис.грн
Баласти в п'яти опорних точках	571.576	0,09476	8,022
Гвинтові палі в п'яти опорних точках	2725.151	5,18438	390,349
Геошурупи в усіх опорних точках	6128.216	12,8188	963,841
Жорсткий диск (платформа)	1109.318	1.22135	97.943



## ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТИПІВ АНКЕРУВАННЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО КУПОЛУ



# ВИСНОВКИ

1. У даній магістерській роботі були розглянуті та виконані комплекс наукових задач, пов'язаних з дослідженням та розвитком використання геодезичних куполів як самостійних споруд, зокрема тимчасових. Здійснений аналіз сучасних вимог технічних нормативних документів та стандартів дозволив визначити основні вимоги до проектування, виготовлення та експлуатації таких будівель.
2. Вивчено небезпечні фактори під час експлуатації, якими виявилися встановлення споруди на хитких нестабільних основах та експлуатація споруди при ураганному вітрі.
3. Встановлено експлуатаційні обмеження для подібних споруд (гранична швидкість вітру, допустимий район за сейсмічністю, граничне навантаження від ожеледі). Це дозволило розробити оптимальні умови для експлуатації геодезичних куполів з тентовим покриттям як тимчасових споруд. Для купольних споруд з каркасом у вигляді геодезичної стрижневої системи діаметром до 15 м допустимий вітровий та ожеледний кліматичний райони – 3, за ожеледдю – 4.
4. Розроблено аналітичні та скінчено-елементні моделі напружено-деформованого стану конструкцій геодезичного куполу, які враховують їх сумісну роботу з тентовим покриттям та ґрунтом основи. Це забезпечило можливість прогнозування їх поведінки під навантаженням та виявило можливі проблемні зони, а також виявило оптимальні варіанти кріплення до земної поверхні (привантаження баластом п'яти полярно симетричних опорних точок куполу). Це сприяло конструюванню раціональної та ефективної моделі куполу.
5. Результати виконаних досліджень можуть бути використані в інженерній практиці при проектуванні та будівництві тимчасових споруд купольного типу.

**ВІДГУК**  
**керівника магістерської кваліфікаційної роботи**

студента (ки) Баранецької Олени Сергіївни  
(прізвище, ім'я, по батькові)

на тему Геодезичні стрижневі куполи

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню поведінки під навантаженням пересувних збірно-розбірних геодезичних стрижневих куполів без стаціонарних фундаментів для малих архітектурних форм. Зміст та наповнення МКР відповідає завданню. Актуальність магістерської роботи обґрунтовується необхідністю зведення нових архітектурно виразних будівельних конструкцій для пересувних збірно-розбірних павільйонів, які можуть виконувати функцію проєкційних кінотеатрів та планетаріїв в індустрії розваг.

В науковій частині роботи проведено ґрунтовний науковий узагальнюючий аналіз наукових та нормативних джерел за напрямком раціонального проєктування купольних систем взагалі та геодезичних сферичних каркасних куполів, зокрема, описано методику збору кліматичних впливів на тонкостінну тентову оболонку покриття. Особлива увага приділена вітровим впливам, які, через низьку масивність і малу вагу геодезичного куполу є визначальними виходячи з критеріїв втрати стійкості та міцності споруди. Виконано скінчено-елементне моделювання напружено-деформованого стану геодезичних куполів діаметром до 15 м з урахуванням особливостей приєднання до основи. Доведено, що без тимчасового анкерування до ґрунтової основи такі споруди є нестійкими та не можуть експлуатуватися. Виявлені найбільш напружені ділянки споруди, якими виявилися фрагменти поблизу дверних прорізів. Запропоновано спосіб посилення цих ділянок улаштуванням додаткових обрамлюючих полігональних або кільцеподібних систем. Запропоновано раціональний спосіб тимчасової анкеровки до ґрунту улаштуванням баластних систем у п'яти полярно симетричних точках. Обчислено економічні показники пропонуваніх конструктивних рішень, які доводять доцільність проведених досліджень.

Наукові дослідження їх інженерно-технічне впровадження виконувалися магістранткою самостійно на високому рівні. Магістрантка, в основному, володіє матеріалом із моделювання, розрахунку та конструювання геодезичних куполів під дією кліматичних впливів, достатньо ерудована, вміє збирати та узагальнювати науковий матеріал. Результати магістерської кваліфікаційної роботи опубліковані у трьох наукових працях та апробовані на двох науково-технічних конференціях.

Дослідження, виконані автором, в рамках МКР, за напрямком розробки раціональних конструктивних рішень геодезичних стрижневих куполів без стаціонарних фундаментів, виконувалися вчасно, у відповідності до затвердженого календарного плану. Рівень підготовки магістрантки високий, відповідає вимогам освітньої програми за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія. Магістрантка заслуговує оцінки «А» (95 балів) та присвоєння їй ступеня магістра будівництва.

**Керівник магістерської  
кваліфікаційної роботи**

Доц. каф. БМГА, к.т.н

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



(підпис)

Попов В.О.

(ініціали, прізвище)

**ВІДГУК**  
**опонента магістерської кваліфікаційної роботи**

студента (ки) Баранецької Олени Сергіївни  
(прізвище, ім'я, по батькові)

на тему Геодезичні стрижневі куполи

Основна увага магістерської роботи акцентована на дослідженнях поведінки під навантаженням пересувних збірно-розбірних геодезичних стрижневих куполів без стаціонарних фундаментів для малих архітектурних форм. Зміст та наповнення МКР відповідає завданню. Актуальність магістерської роботи обґрунтовується потребою зведення нових архітектурно виразних будівельних конструкцій для пересувних збірно-розбірних павільйонів, які можуть виконувати функцію проєкційних кінотеатрів та планетаріїв в індустрії розваг.

В науковій частині роботи проведено ґрунтовний науковий узагальнюючий аналіз наукових та нормативних джерел за напрямком раціонального проєктування купольних систем взагалі та геодезичних сферичних каркасних куполів, зокрема, описано методика збору кліматичних впливів на тонкостінну тентову оболонку покриття. Основний вектор направлений на дослідження вітрових впливів, які, через низьку масивність і малу вагу геодезичного куполу є визначальними виходячи з критеріїв втрати стійкості та міцності споруди. Виконано скінчено-елементне моделювання напружено-деформованого стану геодезичних куполів діаметром до 15 м з урахуванням особливостей приєднання до основи. Обґрунтовано та доведено, що без тимчасового анкерування до ґрунтової основи такі споруди є нестійкими та не можуть експлуатуватися. Виявлені найбільш напружені ділянки споруди, якими виявилися фрагменти поблизу дверних прорізів. Запропоновано спосіб посилення цих ділянок улаштуванням додаткових обрамлюючих полігональних або кільцеподібних систем. Запропоновано раціональний спосіб тимчасової анкерівки до ґрунту улаштуванням баластних систем у п'яти полярно симетричних точках. Обчислено економічні показники запропонованих конструктивних рішень, які доводять доцільність проведених досліджень.

Дослідження в роботі містять деякі недоліки, зокрема не описано технологію збирання геодезичного куполу та недостатня увага приділена дослідженням геодезичних куполів діаметром більше 15 м.

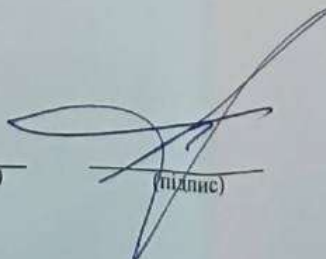
Наукові дослідження їх інженерно-технічне впровадження виконувалися магістранткою самостійно на високому рівні. Магістрантка, в основному, володіє матеріалом із моделювання, розрахунку та конструювання геодезичних куполів під дією кліматичних впливів, вміє збирати та узагальнювати науковий матеріал. Результати магістерської кваліфікаційної роботи опубліковані у трьох наукових працях та апробовані на двох науково-технічних конференціях.

Дослідження, виконані автором, в рамках МКР, за напрямком розробки раціональних конструктивних рішень геодезичних стрижневих куполів без стаціонарних фундаментів, виконувалися вчасно, у відповідності до затвердженого календарного плану. Рівень підготовки магістрантки високий, відповідає вимогам освітньої програми за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія. Магістрантка заслуговує оцінки «А» (95 балів) та присвоєння їй ступеня магістра будівництва.

**Опонент**

К.Т.Н, доц. каф. ТЕ

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



(підпис)

Степанов Д.В.

(ініціали, прізвище)