

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ
КАФЕДРА МІСЬКОГО БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

магістр

(рівень вищої освіти)

на тему Розрахунок сітчастого куполу, виконаного із застосуванням
різнорідних матеріалів

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1922-мбг-з
спеціальності 192 Будівництво та цивільна
інженерія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Міське будівництво та
господарство

(назва освітньої програми)

Бездольний О.Г.

(ініціали та прізвище)

Керівник доц., к.т.н, Банах А. В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент проф., д.т.н, Банах В.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНИ

Кафедра міського будівництва і архітектури
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код та назва)
Освітня програма Міське будівництво та господарство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____
« 01 » _____ 06 20 23 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Бездольний Олег Гаврилович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи (проєкту) Розрахунок сітчастого куполу, виконаного із застосуванням різнорідних матеріалів

керівник роботи доц.к.т.н. Банах А. В.

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

затверджені наказом ЗНУ від « 09 » _____ 10 2023 року № 1584-с .

1 Строк подання студентом роботи 01.12.2023

2 Вихідні дані до роботи Актуальність обраного напрямку досліджень, значимість у сучасному житті, можливість розвинення проблематики, перспективи впровадження майбутніх досягнень, мета роботи, завдання до виконання обраних досліджень, об'єкт досліджень, предмет досліджень, передбачувані методи виконання досліджень

3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Літературний огляд. Порівняльний аналіз матеріалів, що застосовуються. Аналіз одноярусного купола з деревини, металу та збірного залізобетону. Визначення оптимальності застосування будівельних матеріалів залежно від умов довкілля, умов експлуатації.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язків креслень) Презентація із результатами аналітичних обґрунтувань наукових напраму досліджень, результатами експериментальних досліджень результати розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних методів досліджень

5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Банах А. В.		
2	Банах А. В.		
3	Банах А. В.		

6 Дата видачі завдання 01.09.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Проміжок
1	Літературний огляд	01.10	
2	Розділ 1	15.10	
3	Розділ 2	01.11	
4	Розділ 3	15.11	
5	Розробка графічної частини	20.11	
6	Оформлення роботи	25.11	
7	Попередній захист	01.12	

Студент (підпис) Бездольний О.Г. (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) (підпис) Банах А. В. (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер (підпис) Гребенюк І.В. (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бездольний Олег Гаврилович. Розрахунок сітчастого куполу, виконаного із застосуванням різнорідних матеріалів.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 - Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник А.В. Банах. Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні ЗНУ, кафедра міського будівництва і архітектури, 2023.

Проведено комплексні теоретичні дослідження складових однорівневих сферичних оболонок покриттів позитивної гаусової кривизни з прогоною конструкцією із конструктивно-анізотропних матеріалів залежно від виду та схем розподілу зовнішніх впливів, впливу жорсткості розташування опор.

Ключові слова: ПОКРИТТЯ БУДІВЕЛЬ, СФЕРИЧНИ ОБОЛОНОКИ, ОПОРА, КУПОЛ, СФЕРА, СХЕМИ КУПОЛІВ, ОПОРНЕ КІЛЬЦЕ, ДЕРЕВИНА КЛАСУ, ДІАМЕТР КУПОЛУ.

ABSTRACT

Oleg Havrylovich Bezdolnyi. Calculation of a mesh dome made with the use of heterogeneous materials.

Qualifying graduation thesis for obtaining a master's degree of higher education in specialty 192 - Construction and civil engineering, supervisor A.V. Banach. Engineering Educational and Scientific Institute named after U.M. Potebny ZNU, Department of Urban Construction and Architecture, 2023.

Comprehensive theoretical studies of the components of single-level spherical shells of positive Gaussian curvature coatings with a span design from structurally anisotropic materials were carried out, depending on the type and distribution schemes of external influences, the influence of the rigidity of the location of the supports.

Keywords: BUILDING COVERING, SPHERICAL SHELLS, SUPPORT, DOME, SPHERE, DOME SCHEMES, SUPPORT RING, CLASS WOOD, DOME DIAMETER.

ЗМІСТ

	Вступ	8
Розділ 1	ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	11
1.1	Покриття будівель та споруд із застосуванням сітчастих сферичних оболонок	11
1.2	Формування оптимальних трикутних мереж геодезичних оболонок	19
1.3	Шляхи оптимізації параметрів та підвищення надійності купольних конструкцій	27
1.4	Теоретичні дослідження збірних сферичних оболонок	30
1.5	Перспективні сітчасті збірні оболонки з плоскими шестикутними, трикутними панелями та N-вугільними панелями	32
1.6	Висновок по розділу 1	33
Розділ 2	ОБЛАСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	35
2.1	Принцип розрахунку сітчастих куполів по безмоментной теорії	35
2.2	Дослідження напружено-деформованого стану геодезичних куполів-оболонок	41
2.3	Дослідження конструктивно-технологічних рішень геодезичних куполів	44
2.4	Короткі відомості про застосовані матеріали в сітчастих купольних конструкціях	49
2.5	Висновок по розділу 2	52
Розділ 3	КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК	54
3.1	Початкові дані для проектування	54
3.1.1	Загальні відомості про купольну конструкцію	54
3.1.2	Розрахунок снігового навантаження	55
3.1.3	Визначення ресурсної та фінансової ефективності науково-дослідного проекту	57

3.2	Розрахунок куполу сітчастого з деревини	57
3.2.1	Розрахунок і конструювання клеєфанерний панелі	57
3.2.2	Статичний розрахунок кополу з деревини	63
3.2.3	Конструктивний розрахунок купола	66
3.2.4	Розрахунок куполу на стійкість	69
3.3	Розрахунок купола сітчастого з металу	75
3.3.1	Статичний розрахунок купола з металу	75
3.3.2	Конструктивний розрахунок купола	79
3.3.3	Розрахунок куполу на стійкість	80
3.4	Розрахунок купола сітчастого із залізобетона	84
3.5	Висновок по розділу 3	87
	ОСНОВНІ ВИСНОВКИ.....	89
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	91

ВСТУП

У сучасних дослідженнях в галузі сферичних оболонки найбільшу розробку отримали конструкції куполів на основі сіток з трикутними осередками Шведлера і Чивітта, Мухіна-Гвамичави, а також геодезичні системи куполів-оболонки, стрижні яких є ребрами багатокутників, вписаних у сферу. При виборі конструктивних схем куполів-оболонки проглядається тенденція розробки та застосування вже на стадії формоутворення цих покриттів ефективних технологічних рішень виготовлення окремих елементів, стендового укрупнювального складання сегментів оболонки, зведення їх із забезпеченням заданої точності монтажу покриття.

Актуальність теми. У загальному обсязі витрат на зведення будівель із зальними приміщеннями, що перекриваються різними оболонками, на покриття припадає їхня суттєва частина - 20 - 30% за матеріаломісткістю та близько 30 - 50% за трудомісткістю. Тому розвиток конструктивних форм покриттів значною мірою визначає прогрес у всій будівельній галузі. І тут найбільш раціональні збірні оболонки, що формуються з окремих каркасних панелей та панелей-оболонки з високим ступенем заводської готовності, у тому числі з панелей з елементами покрівлі, що дозволяє суттєво зменшувати трудові витрати на будівельному майданчику, знизити вартість та строки будівництва. Тому розробка конструктивно-технологічних форм покриттів, що мають переваги збірних сферичних оболонки, вивчення їх напружено-деформованого стану, розробка конструкцій вузлів, що відповідають новим формам покриттів та з'єднанням збірних елементів є одним із актуальних завдань будівництва будівель із зальними приміщеннями.

Прогрес у галузі будівництва оболонки нерозривно пов'язаний із зменшенням витрат матеріалів та скороченням трудовитрат на конструкції покриття та опорного контуру, у тому числі при зведенні об'єктів на будівельному майданчику. В області купольних покриттів найкращі показники за вказаними критеріями мають збірні сферичні оболонки. Про це

свідчать численні приклади їхнього будівництва. Використання збірних сферичних куполів-оболонки відноситься, як правило, до унікальних будівель та споруд (спортивні об'єкти, кіноконцертні зали, криті ринки тощо). Застосування збірних сферичних оболонок у масовому будівництві стримується їхньою підвищеною трудомісткістю на будівельному майданчику, що є наслідком низького ступеня їхньої індустріалізації. Для вирішення цієї проблеми пропонуються конструктивно-технологічні рішення, засновані на індустріалізації їх елементів, що визначає новий напрямок у галузі збірних сферичних купольних покриттів будівель та споруд.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є аналіз дослідження одноярусного куполу сітчастого з деревини, металу і збірного залізобетону.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є покриття будівель та споруд у вигляді зірної сферичної оболонки.

Предмет дослідження. Закономірності конструктивно-технологічного формоутворення збірних сітчастих куполів, розробка конструкцій збірних елементів одноярусного сітчастого купола на основі додекаедра у вигляді кристалічної мережі Фуллера з ефективними технологіями виготовлення та зведення.

Методи дослідження. У роботі використано методи теоретичного дослідження конструктивно-технологічних можливостей збірних сферичних оболонок; закономірностей оптимального формоутворення конструкцій купольних покриттів будівель та споруд; методи математичної статистики; методи будівельної та теоретичної механіки, що визначають напружено-деформовані стани конструкцій.

Наукова новизна одержаних результатів. Наведено варіанти оптимізації геометричних параметрів трикутних мереж на сфері. У кожному з них критерієм оптимальності є мінімальна кількість типорозмірів конструктивних деталей та мінімальна кількість монтажних елементів купола, можливості укрупнювального складання.

Практичне значення одержаних результатів. Проведено комплексні теоретичні дослідження складових однорівневих сферичних оболонок покриттів позитивної гаусової кривизни з прогоною конструкцією із конструктивно-анізотропних матеріалів залежно від виду та схем розподілу зовнішніх впливів, впливу жорсткості розташування опор.

Особистий вклад дослідника. Постановка мети і завдання дослідження. Збір і аналіз даних для проведення дослідження.

Апробація результатів роботи. Результати роботи докладалися на III Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України» з доповіддю «Покриття будівель та споруд із застосуванням сітчастих сферичних оболонок»[47].

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, основних висновків, списку використаних джерел містить 95 сторінок, 37 рисунків, 6 таблиць, 47 список використаних джерел.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Покриття будівель та споруд із застосуванням сітчастих сферичних оболонок

Геометричною основою формоутворення куполів і оболонок є різні способи розбивки поверхні на мережі, що складаються з багатокутних осередків (трикутних, трапецієподібних, гексагональних та ін.). У сучасній практиці купобудування найбільше застосування отримали сітчасті сферичні бані на основі сіток з трикутними осередками, а також геодезичні системи куполів, стрижні яких є ребрами багатокутників, вписаних у сферу і, відповідно, два способи членування поверхні сфери: сітчастий та геодезичний. Принцип побудови куполів на основі сіток із трикутними осередками полягає в проектуванні деякої плоскої мережі на поверхню сфери. Для цього сферичний купол членують на певну кількість однакових просторових секторів або сегментів, кожен з яких розбивається на дрібніші трикутні осередки. Найбільш прості та універсальні рішення виходять при розбитті поверхні купола у вигляді повторюваних та сумісних частин сфери.

Формоутворення сітчастих та пластинчастих (панельних) куполів-оболонок на поверхні у вигляді сфери є комплексним процесом. Вже на цій стадії проектування вирішуються основні архітектурні, конструктивні та технологічні завдання. Таким чином, вибір та розрахунок геометричної схеми купола є дуже відповідальною стадією проектування, оскільки саме від цього залежить кількість типорозмірів елементів, конструкція вузлів сполучення, способи виготовлення та монтажу елементів і в кінцевому підсумку ефективність конструкції.

У процесі формоутворення сітківки на поверхні сфери виділяють два етапи: 1) вибір способу розрізання (під терміном "розрізка" розуміється

спосіб нанесення на обрану поверхню мережі геометричних ліній каркасу, або панелей купола); 2) розрахунок координат вузлів.

Для сфери часто-густо за основу приймають радіально-кільцеву систему розрізки. Суть цієї системи полягає в членуванні поверхні обертання меридіональними та паралельними площинами на трикутні (біля полюса) та трапецієподібні елементи (рис. 1.1). Число типорозмірів трикутних і трапецієподібних елементів при цій системі розрізки визначається числом ярусів між паралельними перерізами і залежить від числа меридіональних перерізів, а також від форми утворюючої меридіональної кривої. При формоутворенні сферичних сітчастих оболонок на плані, близькому до прямокутного або шестикутного, використовують також мережу меридіанів, утворену перетином зі сферою двох або трьох пучків променів з меридіональних або довільних площин з осями, що взаємно перетинаються (двох або трипроменевої системи). Як видно із схем рис. 1.1 б і в число типорозмірів елементів при такому розрізанні значно більше, ніж при радіально-кільцевій системі.

Основними застосовуваними нині схемами побудови сітки куполів є: радіально-кільцева зі зв'язками (купол Шведлера, рис. 1.2 а); відома (купол Феппля, рис. 1.2 б); схема Чівітта (рис. 1.3 а); схема "Ромб" (рис. 1.3 б) [3-5, 11-15].

Первинна розбивка так званої зірчастої системи – меридіональна (рис. 1.2 б). На сферичний сегмент наносять мережу меридіанів. Кожну отриману ділянку ділять чотирикутними осередками таким чином, щоб два протилежні вузли осередку розташовувалися на одному меридіані, а два інших - на одній паралелі. Зірчастий купол у своїй основі має рівнобедрений трикутник. Тут на відміну купола Шведлера (рис. 1.2 а) є кільця, але немає ребер. Різна форма конструкції досягається завдяки зміні довжин меридіональних сторін трикутників сітки.

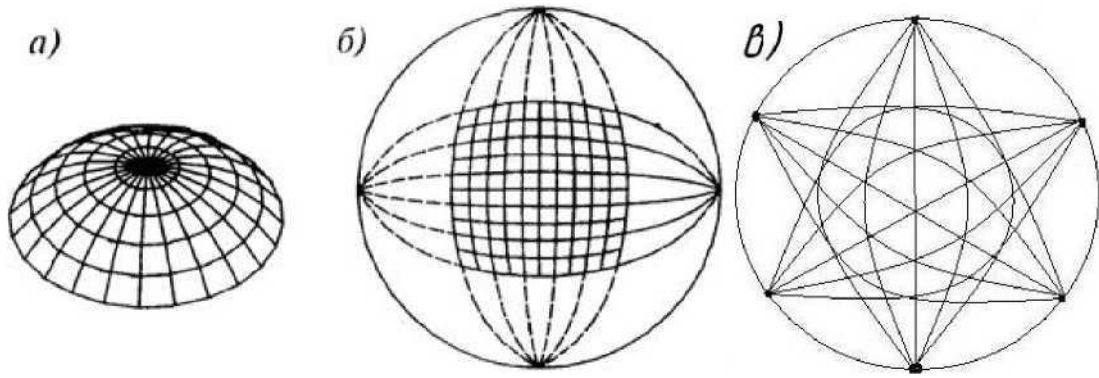


Рисунок 1.1 -Формування сітки купола за способом розрізання сфери:

а - радіальнокільцева розрізка;

б - розрізання сфери двома пучками меридіональних площин із взаємно перпендикулярними осями (двопроменева);

в - розрізка сфери трьома пучками променів з меридіональних або довільних площин з взаємно трьома осями, що перетинаються (трипроменева).

Може бути побудовано два різновиди мереж, що застосовуються для зірчастої системи розрізання, - правильна мережа Чебишева та мережа локсодромій (ліній, що мають постійний кут нахилу до меридіана).

При зірчастій розбивці довжину всіх меридіональних стрижнів призначають однаковою, що призводить мережу, що утворюється, до правильної мережі Чебишева. Застосування правильної мережі Чебишева (рис. 1.2 б, в) призводить до згущення сітки з наближенням до полюса купола. У зірчастій схемі всі меридіональні стрижні мають однакову довжину, довжина стрижнів у кільцевому напрямку зменшується до верху від ярусу до ярусу. У схемі меридіонально-перехрещується довжина всіх стрижнів постійна. Вони утворюють сітку ромбічних осередків, яка називається правильною мережею Чебишева. Використання мережі локсодромій частково усуває цей недолік, проте значне зменшення довжини бокових сторін трикутників також спричиняє згущення сітки (рис. 1.2, в). У зірчастій системі із застосуванням мережі Чебишева довжина стрижнів вздовж ліній мережі постійна, хоча зміна кутів між стрижнями призводить до

того, що кількість вузлових елементів дорівнює кількості ярусів. При локсодромній розрізці, навпаки, вузлові елементи можуть бути одного типорозміру, а число типорозмірів стрижнів, розташованих уздовж ліній мережі, може дорівнювати числу ярусів.

Система Чивітта усуває основний недолік зірчастої системи – згущення сітки. Первинна розбивка – меридіональна. Основу кожного отриманого сектора ділять на певну кількість рівних ділянок, а потім проводять кільцеві перерізи, число яких дорівнює числу членування основи. Кожен кільцевий переріз ділять на рівні частини, кількість яких у кожному наступному перерізі, рахуючи від основи сектора, зменшують на одиницю (рис. 1.2).

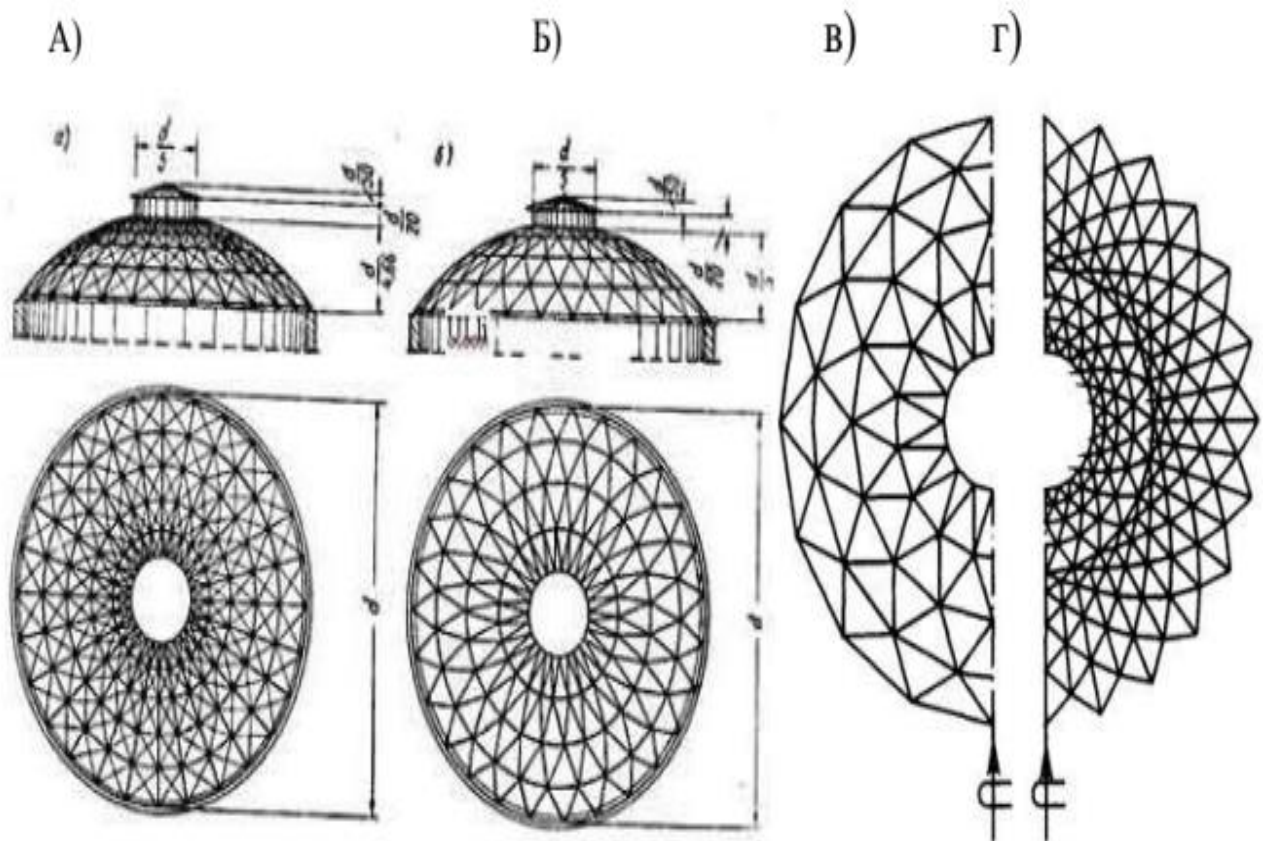


Рисунок 1.2 - Схеми куполів:

- а - купол І. В Шведлера; б - зірчастий;
- в-зіркова система на основі мережі Чебишева;
- г - на основі мережі локсодромій.

Отримані точки зв'язують і таким чином отримують мережу трикутників, основа яких повдоль шкірного ярусу, як і в зірчастій системі, рівні. Проте утворені таким чином трикутники на відміну від зірчастої схеми нерівностегнові, тому число їх типорозмірів відповідає квадрату числа розчленовувань (ярусів). У системі Чивітта (рис. 1.3) всі вузли ярусу лежать в одній горизонтальній площині, що дозволяє при розбитті куполу проектувати однакові відстані між кільцями або довжину кільцевих елементів в одному ярусі. Система Чивітта може бути представлена як зімкнуті на сфері трикутні мережі секторів з вершинами, перетину трьох пучків паралельних плоскостей і поверхні сфери, що складаються з безлічі точок. Сектори зістиковані з сферичних трикутних мереж по осі симетрії сектора, шкірна половина з яких утворена пучком плоскостей, паралельних одній і другій межі сектора, і пучком, що складається з кільцевих плоскостей. Тому формоутворення круглих у плані покриттів за цією системою вирішується досить просто, з круговим опорним кільцем. Найбільш ранньою застосованою, відомою з минулого століття, геометрією поверхні сітчастого куполу, є схема Шведлера (рис. 1.2)[3].

Найбільший купол цієї системи побудовані у 1955 р. у Шарлоті (США) прольотом 101,8 м, заввишки 34 м [3-5]. Добрі результати при вирішенні завдань зниження числа типорозмірів та діапазону варіювання кутів у конструюванні дає використання схеми Чивітта. У цій схемі всі вузли ярусу лежать в одній горизонтальній плоскості, число осередків у кожному ярусі збільшується від центру до краю в арифметичній прогресії [3-5,16,17]. За схемою Чівітта з 12 секторами побудовані купольні покриття у Х'юстоні (США) прольотом 195,6 м /13/ і Новому Орлеані (США) прольотом 207,3 м [3-5, 18, 19, 20]. Також багато прикладів здійснених куполів із зірчастим розбиттям. Здійснені куполи, прольотами від 18,3 м/290/ до 93,5 м, розроблений проект куполу прольотом 275 м [3]. Зірчаста схема може бути виконана і в іншому варіанті [3-5]. Суть цієї системи "Ромб-1" полягає у первичном меридіональному діленні куполу на сектори з подальшим

розчленовуванням шкірного сектора на ромбовидні осередки шляхом нанесення правильної мережі Чебишева.

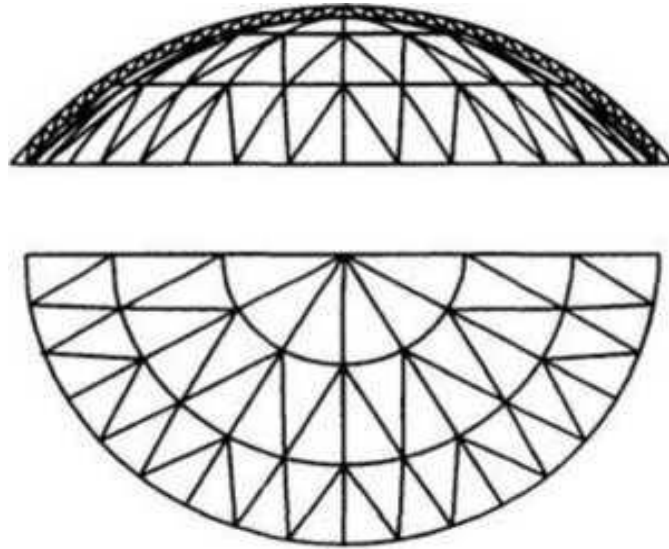


Рисунок 1.3 - Перехід до зімкнуто-лучових розрізань: а – система Чивітта; б – система «Ромб-1» на основі мережі Чебишева.

Якщо в зірчастій схемі протилежні вузли осередку мережі розташовані на меридіанах або відповідно на паралелях, то в цій системі лінії мережі Чебишева різних напрямів розташовуються вдоволь бокових сторін сектора. Ромбічна мережа, показана на рис. 1.3, побудована на основі правильної мережі Чебишева, відрізняється рівністю довжин стрижнів, розташованих у меридіональному напрямі. В результаті такого розбиття виходить досить рівномірна мережа з рівнобедрених трикутників, число типорозмірів яких приблизно вдвічі менше, ніж у системі Чивітта. Система "Ромб-1" застосована, зокрема, при проектуванні куполу діаметром 65 м у Душанбе (рис. 1.4).

На відміну від зірчастої системи та системи Чивітта, основи секторів ромбічного купола не збігаються з кільцевими перерізами та утворюють просторову (неплоску) криву [3-5, 13]. Система може бути представлена як зімкнені на сфері трикутні мережі секторів з вершинами з безлічі точок перетину трьох пучків паралельних площин та поверхні сфери.

Кожен сектор утворений двома пучками площин, паралельних одній і

другій межі сектора, і пучком, що складається з кільцевих площин. Тому формоутворення круглих у плані покриттів за цією системою вирішується відносно складно.

Б. Г. Мухін, А. С. Гвамичава, Н. Царапкін і Г. Г. Зедгінідзе [21] в 1987 отримали авторське свідоцтво СРСР на купольне покриття з плоских панелей. Збірна сферична оболонка складається з шестикутних різнотипних марок 3 панелей, зібраних з двох зістиківаних по довгій стороні 4 трапецій 5 і 6. Бічні сторони трапецій 7 для панелей всіх марок рівні. Основи панелей 8 мають спадну довжину від центру, при цьому панелі пов'язаних меншими основами трапецій утворюють однакові ряди 9 різнотипних марок.

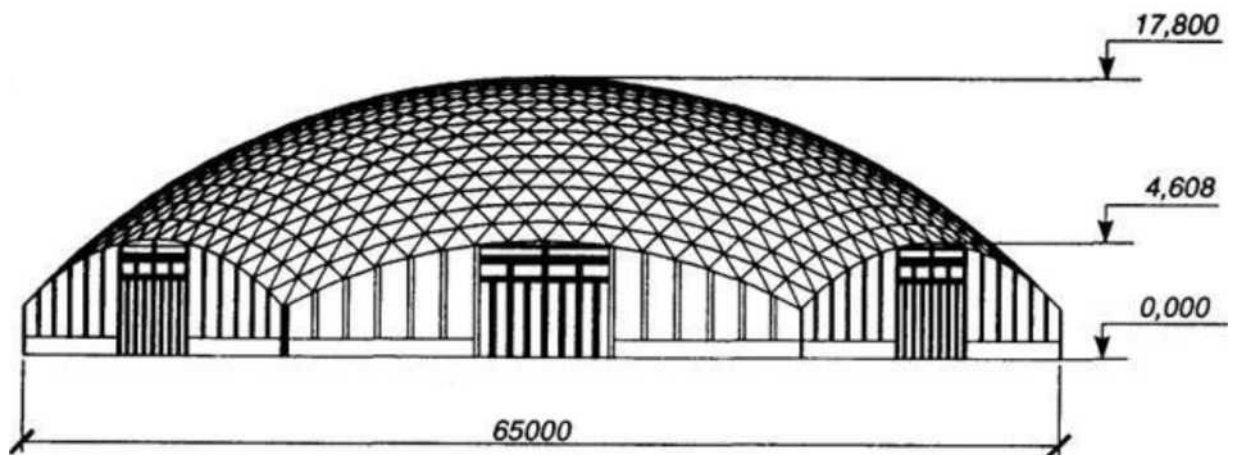


Рисунок 1.4 - Купол діаметром 65 м у Душанбе (розрізання системи "Ромб-1").

Збірні елементи цього бані на відміну від відомих симетричні і можуть виконуватися з двох плоских трапецієподібних панелей.

Двопроменеві системи та зімкнені променеві системи застосовуються в основному для пологих сферичних куполів. Однак окремі варіанти розрізок дозволяють отримувати зруйновані купольні покриття, а наявні вирізи в схемах трикутних сіток можуть бути використані для організації входів, в'їздів та світлових огорож. З погляду методики проектування геометрія радіально-кільцевого членування поверхонь надзвичайно легка для застосування.

Геометрія меридіонально-кільцевого членування поверхонь не вимагає при проектуванні складних обчислювальних операцій і тому доступна будь-якому проектувальнику. Сітчасті бані за конструктивним виконанням можуть бути односітчастими (одношаровими) і двосітчастими (двошаровими).

Каркаси односітчастих куполів можуть формуватися із стрижнів із різним типом перерізу. Найбільш поширеним типом перерізу стрижнів є трубчастий, як найбільш економічний за витратою матеріалу. Застосовуються, але значно рідше інші типи перерізів. Каркаси двосітчастих куполів формуються зі стрижнів складеного перерізу, виконаних на кшталт ферм з паралельними поясами. Пояси можуть мати тавровий або Н-подібний переріз. Сполучна грати розташовується в одній або двох площинах, останнє відноситься до випадку потужних широких поясів. Істотними конструктивно-технологічними вадами меридіонально-кільцевих схем розбивки є дуже дрібні осередки в зенітній частині купола, а також велика кількість типів елементів розбивки, варіювання кутів з'єднання елементів практично від 0 до 180 градусів.

Геометрія проектування трипроменевого та зімкнутого променевого членування сферичних поверхонь відносно важка для реалізації. Вона вимагає під час проектування складних обчислювальних операцій, але, враховуючи розвиток комп'ютерних технологій, зараз ця геометрія також доступна проектувальнику. Істотними конструктивно-технологічними недоліками трипроменевих і зімкнутого променевих схем розбивки є наявність багатьох панелей різноманітних напрямків по відношенню до поверхні сфери, а також велика кількість типів елементів розбивки. До переваг цих схем відноситься можливість їх застосування на будь-якій поверхні обертання або комбінації декількох поверхонь обертання [3-5, 13] та порівняно невелика кількість типорозмірів елементів. Ці якості дозволяють вибрати загальну форму покриття та геометричні характеристики каркасу, що оптимально задовольняють вимогам функціонального призначення будівлі, економічності, а також досить просто вирішити схему

каркасу та забезпечити зручність монтажу.

Для зведення куполів, запроектованих за меридіонально-кільцевими та зімкнуто-променевими схемами застосовують відомі методи укрупнювального складання елементів, монтажу конструкцій по лісах, підрощування або нарощування, як правило, трикутних панелей.

1.2 Формування оптимальних трикутних мереж геодезичних оболонки

Геодезичною розбивкою прийнято називати членування поверхні сфери шляхом проведення головних (геодезичних) ліній, що взаємно перетинаються, на попередньо виділених типових ділянках. Зауважимо, що геодезичною лінією на сфері називають коло з радіусом, рівним радіусу сфери (велике або головне коло). Типові ділянки як сферичних прямокутних трикутників (трикутники Шварца) зазвичай утворюються шляхом центрального проектування на сферу граней правильних багатогранників. У цю групу трикутних мереж на сфері входять геодезичні (спосіб розбивки Фуллера), кристалічні (способи розбивки Туполева, Павлова, Миряєва) бані та його численні модифікації [1-9, 22, 23]. На відміну від мереж меридіонально-кільцевої побудови, де розміри осередків у полюсній та екваторіальній частинах різко відрізняються один від одного, геодезичні мережі, навіть при дуже великій кількості осередків, візуально зберігають властивість рівногранності вихідних багатогранників - розміри осередків мережі в межах типової ділянки відрізняються один від одного друга не настільки різко. При цьому значно зменшується кількість типів елементів розбивки. Перші ж спроби практичного застосування геодезичних мереж виявили дві її суттєві особливості: 1) композиційно-пластичні характеристики куполів, що проектуються на їх основі, різко відрізняються від куполів на традиційній геометричній основі; 2) багатоваріантність геометричних побудов.

З появою будь-якої нової геометричної основи з'являються нові форми

купольних споруд. Якщо на існуючій геометричній основі з її обмеженими можливостями було створено велику різноманітність композицій куполів, то будь-яка нова геометрія відкриє ще більшу різноманітність форм покриттів. Однак, при реалізації нового напрямку проектування куполів та оболонки виникають суттєві теоретичні труднощі. Це викликано тим, що характеристики геодезичних розбивок мереж зумовлені вихідними геометричними параметрами правильних багатогранників. Так як існує багато прийомів розбивки, що відповідають різним конструктивним видам куполів, необхідно мати не розрізнені і випадкові дані про геометрію розбивок, а повну їхню сукупність за всіма видами мереж у діапазоні практично прийнятних типів. В даний час основними стримуючими факторами в галузі проектування куполів є:

- надзвичайно мала кількість інформації про теоретичну розробленість їх геометричної основи, не розробленість методик вибору мереж для конкретних випадків проектування оболонки;

- крім таблиць параметрів мережових розбивок або координат вузлових точок необхідні оптимальні геометричні схеми або доступні та зрозумілі методи оптимізації геометричних та технічних параметрів збірних покриттів.

Як відомо, основою побудови способом Туполева є усічений ікосаедр. Вершини та центральні точки всіх граней ікосаедра, спроектовані на сфері, при з'єднанні утворюють вихідний 180-гранник. Отримані рівнобедрені трикутники двох видів далі можуть бути розбиті дугами великих кіл на дрібніші грані (рис.1.5). Основа та отримані подальшим дробленням граней на трикутники багатогранники мають вершини, які можуть бути описані як безліч точок на сфері, описаних різними радіусами з вершин та середин ребер правильних сферичних п'ятикутників та шестикутників або від осей, що проходять через ці точки сфери. М. З. Туполев ці куполи назвав «кристалічними» [23-29]. У літературі закріпився варіант назви "геодезичні". Ікосаедр із розміром сторони трикутника «а» описується сферою з радіусом $R = 0,9510564a$. Заповнення сферичних

рівносторонніх трикутників може бути різним, відповідно зовнішній вигляд поверхні купола та образ споруди загалом набувають різного естетичного звучання (рис. 1.5).

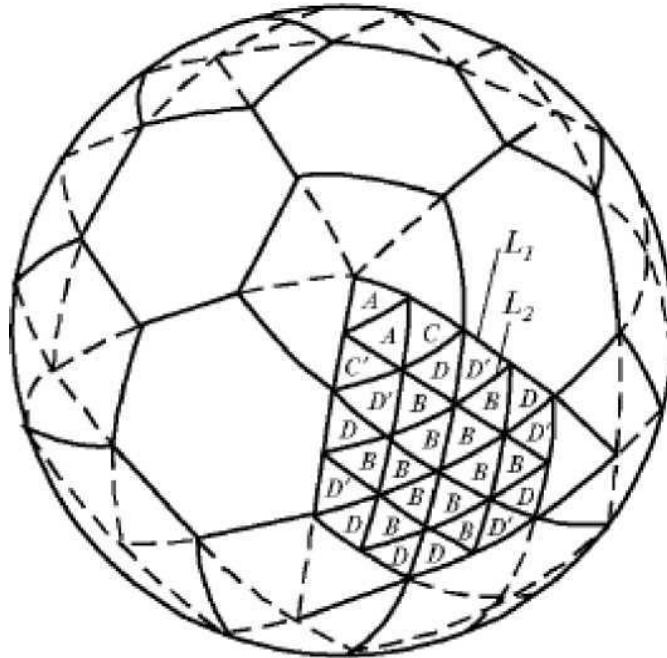


Рисунок 1.5 - Один із способів отримання мережевих розбивок поверхні сфери на основі усіченого ікосаедра у вигляді кристалічної мережі Туполева

Головні проблеми виникають при проектуванні куполів великих прольотів, тут у процесі багаторазового збільшення стадій членування, лавиноподібно зростає кількість типів деталей. Так, наприклад, деякі різновиди 2880-гранних мереж дають кількість типів граней до 30 і більше, а в 24000-гранних мережах кількість типів граней сягає 300 [27-29].

Одна з мережевих розбивок, оптимальна для проектування прольотних куполів, була розроблена Р.Б. Фуллер наприкінці 50-х років. Ця мережа дозволяла досягти найменшого числа типів трикутних та ромбоподібних збірних деталей купола порівняно з іншими видами мереж. [6, 9, 10, 27, 30].

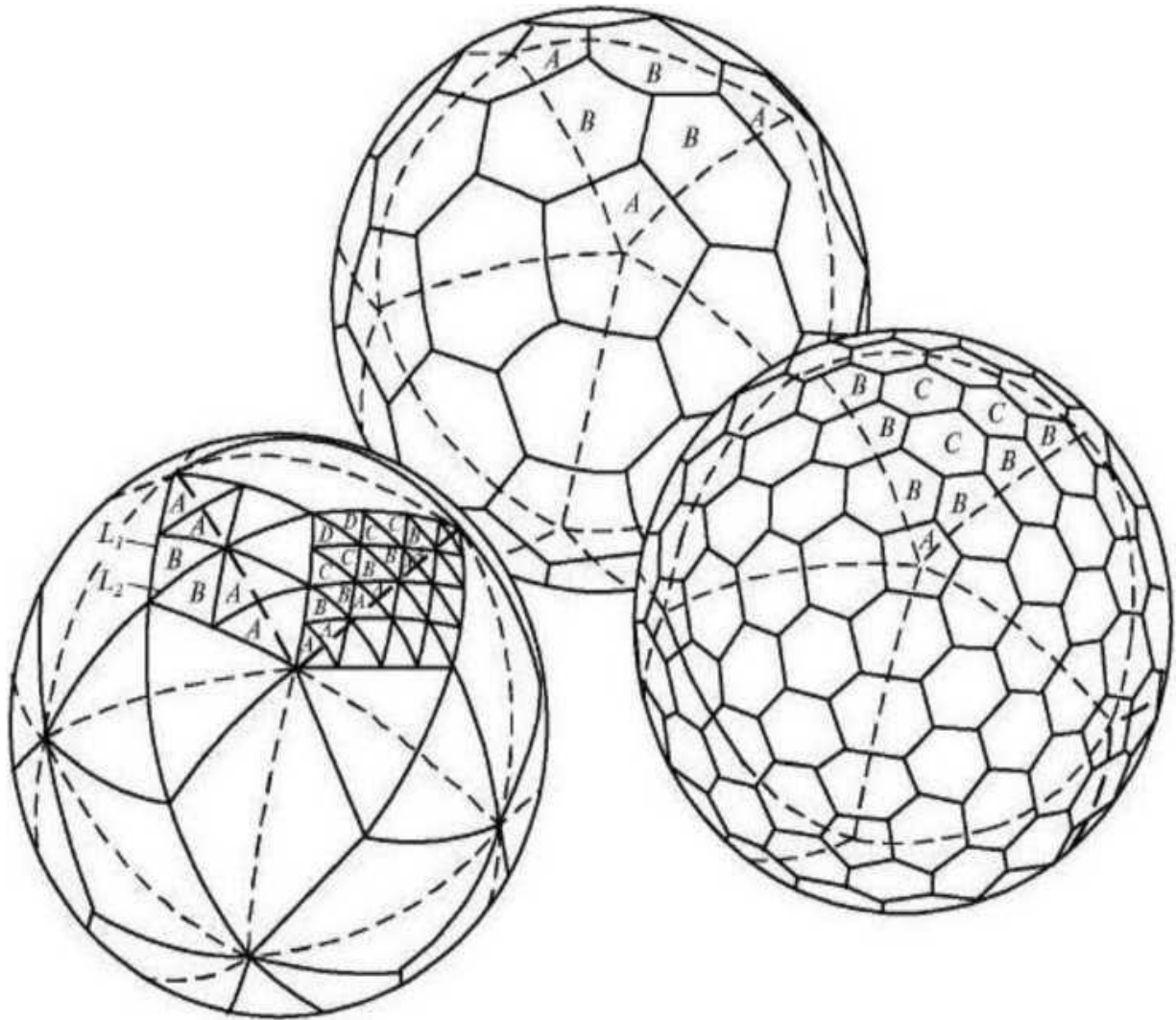


Рисунок 1.6 - Способи отримання розбивок мережі поверхні сфери на основі додекаедра у вигляді геодезичної мережі Фуллера.

На рисунку 1.6 показані принципи побудови одноконтурного геодезичного куполу, починаючи від простого додекаедра, що перебуває на 12 правильних п'ятикутників. Суть способу полягає в описі додекаедра сферою та подальшому дробленні на 60 однакових сферичних рівнобедрених трикутників (рис. 1.6). Основа і отримані подальшим дробленням граней на трикутники багатогранники мають вершини, які можуть бути описані як безліч точок на сфері, описаних різними радіусами з вершин і середин ребер правильних сферичних п'ятикутників або від осей, що проходять через ці точки сфери. У рівнобедрених трикутників А ліворуч і праворуч прилаштовуються однакові трикутники В і т.д. Зі збільшенням числа членувань, число типорозмірів збільшується лінійно. Лінії розбивки в межах

кожного вихідного трикутника утворені дугами великих кіл і є геодезичними лініями на сфері. Загальна кількість граней дорівнює $60 n^2$; число типорозмірів панелей, типорозмірів стрижнів і число вершин багатогранника відповідно рівні, $2n - 1$, $2n$, $2n$ (n - числа членувань вихідного трикутника, так званого трикутника Шварца).

У ті роки Р.Б. Фуллером була запропонована мережна розбивка, оптимальна для конструювання куполів, що збираються з деталей у вигляді шестигранних пірамід. Однак, у цьому методі недоліком було різноманіття форм укрупнених елементів та використання опорних елементів, що не лежать в одній площині.

Крім одноконтурних існують двоконтурні бані, в яких простір між контурами використовується для технічних потреб або для розміщення утеплювача тощо. Перші два двоконтурні бані з укрупненими елементами були спроектовані на основі 8640-гранної мережі. У куполі «Кліматрона», наприклад, нижній контур має трикутну мережу, а верхній – гексагональну. Остання утворена шляхом використання ліній розбиття нижнього контуру. У кутових точках гексагональної комірки поставлені стійки і верхні кінці стійок з'єднані гнучкими стрижнями із середньою точкою гексагональної ділянки нижнього контуру, де сходяться вершини шести трикутників. Трикутні панелі з акрилового скла підвішені до вузлів нижнього контуру.

У той же час велика кількість куполів була виконана Фуллером у вигляді 320-гранників, які далекі від оптимальних типорозмірів.

Вище було показано, що вся різноманітність відомих до 2000 року конструктивних рішень геодезичних оболонки представлена О.М. Супруном і Р. М. Павловим у тому роботах [23, 40, 41,42] п'ятьма системоутворюючими прийомами розбивки поверхні сфери. Слід зазначити, що всі п'ять системоутворюючих розбивок можуть бути ікосаедральними, октаедральними або тетраедральними розбивками відповідно до прийнятих для розрахунку видів вихідного типового трикутника Шварца. Крім того, кожна із системоутворюючих розбивок матиме подвійні підсистеми

декількох видів, що дозволяють виконувати куполи двопоясними. Вся сукупність аналізованих систем розбивки утворюватиме складну структуру, яку Павлов [23, 40, 41] відобразив графічно як схеми (рис. 1.7). При цьому кожен конкретну розбивку сфери на елементи всередині деякої системоутворюючої розбивки він позначає, як $N - M$, де N - загальна кількість елементів у сфері, M - умовне позначення підсистеми розбивки. Наприклад, «17280 – Р» (розбивка системи Р на 17280 трикутних граней), «2880 – Р1» (розбивка підсистеми Р1 на 2880 трикутних граней), «720 – П1» (розбивка підсистеми П1 на 720 трикутних граней) тощо. Зауважимо, що N не може бути довільним цілим числом, тому що послідовне подрібнення трикутника Мебіуса або Шварца в кожній системі розбивки призведе до змішування меж типових сферичних трикутників. Ці, що найбільш використовуються з розбивок, включені Г.М. Павловим до бази даних системи автоматизованого проектування геодезичних оболонок. Спільним для геодезичних куполів і те, що розміри елементів каркаса (решітки) відрізняються по довжині друг від друга незначно. Ця особливість мереж, що розглядаються, використовується у виведенні формул для визначення зусиль у стрижневому сітчастому куполі наближеним методом статичної еквівалентності [6-10, 42-45], в якому передбачається, що осередки решітки близькі до рівностороннього трикутника.

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ КУПОЛ І В І ОБОЛОНОК

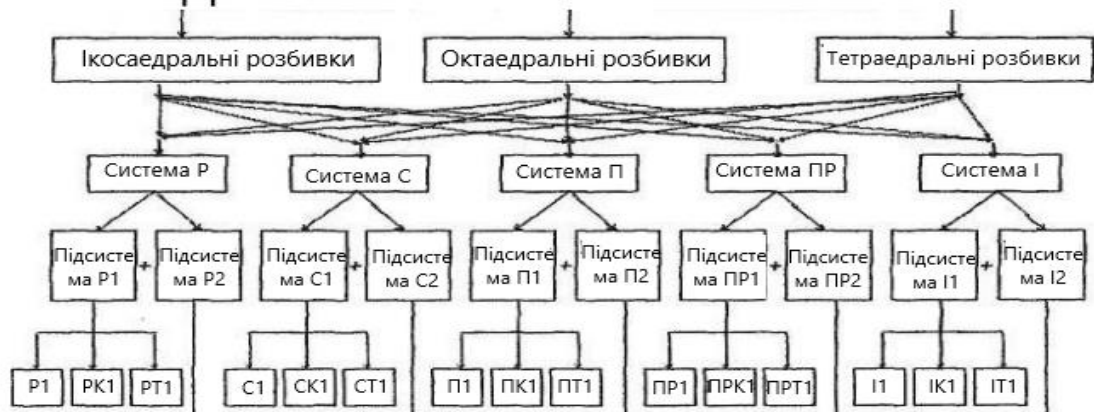


Рисунок 1.7 - Класифікація системоутворюючих геодезичних розбивок

Припущення про рівну довжину і рівні перерізи елементів сітчастого купола використовується і в роботах при статичному розрахунку та визначенні маси куполів, з метою спрощення та скорочення часу автоматизованих розрахунків. Два припущення про рівні довжини і перерізах всіх стрижнів у куполі приводять до умовної геометричної схеми з ідеалізованою мережею, що складається з рівносторонніх трикутників (купола з рівномірними трикутними ґратами), яку і приймають як розрахункову модель для куполів другої групи. У композиційному відношенні трикутники Шварца — ікосаедральний та октаедральний — однотипні, вони є прямокутними сферичними трикутниками. Внаслідок цього будь-яка мережа, отримана на одному трикутнику Шварца, має відповідне відображення на іншому трикутнику та мережі розрізок відрізняються лише кількісними значеннями параметрів.

Звідси, Павлов робить висновок - алгоритм геометричного розрахунку параметрів розрізок, складений для конкретної системи, можна застосовувати, використовуючи визначення параметрів мереж на відповідному трикутнику Шварца. Багатогранники геодезичної або кристалічної розрізки мають осі симетрії (обертання і дзеркально поворотні), тому для варіантів побудови сферичних мереж достатньо виконати розрізання тільки всередині сегментів граней (сферичний трикутник Мебіуса), що становлять одну шосту частину грані ікосаедра або октаедра. Розрізки, запропоновані Павловим, можна як безліч точок на сфері, описаних головними колами з різними радіусами з центру сфери, або кіл з різними радіусами, паралельними ребрам граней ікосаедра, додекаедра чи октаедра, від відповідних осей симетрії. Застосовуючи зібрані та систематизовані методики, розроблено автоматизовані засоби вирішення зазначеної проблеми в системі ArchiCAD, доповненої спеціальними бібліотечними елементами.

Бібліотечні елементи надають можливість скористатися будь-якою з чотирьох систем розбивки оболонки:

- одноконтурна система із плоских шести- та п'ятикутників (система

«П» — рис. 1.8 а, б);

- одноконтурна система із шести- та п'ятикутників, до числа яких для зменшення кількості типорозмірів введено декілька неполюських елементів (система «ПР» — рис.1.6, 1.8 в);

- двоконтурна система, що складається з п'яти- та шестигранних пірамід, вершини яких з'єднані стрижнями (система «Р» - рис. 1.8г);

- двоконтурна система з тригранними пірамідами, вершини яких також з'єднані стрижнями (система "С" - рис. 1.8 в, г).

У кожній системі розбивки користувач може вибрати один із дванадцяти варіантів розбивки, що відрізняються числом поділу повної сфери на елементи. Для систем "П" і "ПР" вказане в таблиці число трикутних граней означає сумарне число трикутників, що становлять шести-і п'ятикутні елементи. На рис. 1.8 показано кілька прикладів виведених на екран фрагментів оболонок у вигляді однієї секції (трикутника Мебіуса - типового елемента розбиття повної сфери на 20 однакових секцій), двох секцій, п'яти секцій та довільно обраної на сфері схеми.

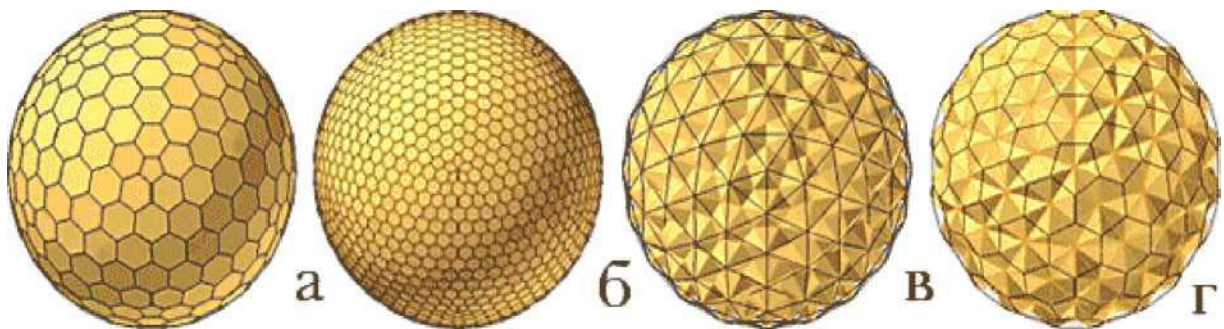


Рисунок 1.8 - Варіанти розбивки сфери поверхні на елементи

Результати досліджень О.М. Супруном і Г. Н. Павловим, а також порівняно невеликий досвід практичного проектування та будівництва геодезичних куполів і оболонок, є вихідною базою наступних теоретичних досліджень.

Підводячи підсумок сказаного вище, можна виділити три істотні чинники, які пояснюють, чому нашій країні геодезичні куполи будувалися

рідко:

- на відміну від традиційних куполів радіально-кільцевого членування, проектування сучасних сітчастих куполів неможливе без заздалегідь обчислених геометричних параметрів ефективних монтажних елементів;
- практична відсутність систематизованих та узагальнених відомостей про геометрію багатокористувальних мережевих розбивок на ефективні монтажні елементи, а також повну відсутність теоретичних обґрунтувань розрізок з плоскими фігурами та розмірами більше трикутника чи ромба;
- суттєвою особливістю геометрії мережевих розбивок є різноманіття архітектурних пропозицій та нестача ефективних варіантів конструктивно-технологічних рішень куполів.

1.3. Шляхи оптимізації параметрів та підвищення надійності купольних конструкцій

Завдання оптимізації трикутної геометричної мережі на сфері за критерієм мінімуму матеріалу несучих елементів ставилося багатьма авторами [15, 17, 18]. Діяльність А.Н. Раєвського та Л.А. Раєвського розглянуто використання методів математичного програмування при виборі цільової функції та складанні умов задачі оптимізації просторових рамних систем з урахуванням вимог реального проектування. Цільовою функцією служить вираз обсягу (маси) матеріалу конструкції. Слід виділити роботи Мольова І.В. та Молевой Р.І. засновані на результатах чисельного дослідження закономірності зміни маси сітчастих куполів [25]. Як цільову функцію авторами прийнята функція маси сітчастого купола, як обмеження - умови міцності і жорсткості. Для вирішення задач оптимізації Молева І.В. і Молевой Р.І. використовували ітераційний метод, основу якого прямий розрахунок конструкції та отримання інформації про стан системи, що дозволяє виконати корекцію всього масиву шуканих параметрів - площ всіх елементів. І.В. Молевым встановлено, що з сітчастих куполів всіх типів

збільшення прольоту викликає нелінійне збільшення їхньої маси. Нелінійний характер цієї залежності обумовлюється впливом конструктивного коефіцієнта та обмеженнями мінімально можливої площі перерізу елементів і граничної гнучкості. Отримано аналітичну залежність маси конструкцій купола від величини прольоту, яка представлена у вигляді $g = k g_0 - 1/l_0$

де g_0 - показник маси купола прольотом l_0 ,

g -то ж прольотом l ;

k -коефіцієнт, що враховує нелінійність зміни маси конструкцій за зміни величини прольоту.

На основі багатоваріантних розрахунків виявлено параметри, що впливають на величину коефіцієнта k у куполів різного типу, та отримані його кількісні значення. Виконані в роботі дослідження показали, що оптимальне значення стріли підйому залежить від багатьох факторів: прольоту, навантаження, кількості елементів та вартості конструкцій покриття, що захищають. Тим не менш, загальна тенденція така: збільшення прольоту та навантаження викликає збільшення значення оптимальної стріли підйому. Встановлено також, що кількість елементів стрижневого сітчастого бані суттєво впливає на характеристики маси. Показник маси купола в залежності від зазначених параметрів змінюється в широкому діапазоні, і значення g оптимального варіанта може відрізнятися від найгіршого в кілька разів. І. В. Молевим розглянуто також закономірності зміни маси при зміні величин постійних та тимчасових (снігового та вітрового) навантажень. При зміні навантаження показник маси змінюється найінтенсивніше у пологих куполів. Для кожного значення стріли підйому характерно наступне: зміна маси системи зі зміною навантаження більш інтенсивно відбувається у куполів з великою кількістю ярусів і меншим числом сторін. Аналіз отриманих результатів показує, що маса залежність - навантаження може бути прийнята лінійною. Роботи Гайдарова Ю.В., Зотової Н.Г., Козьміної В.К., присвячені вибору оптимальної висоти сітчастих куполів та склепінь, а також тришарових оболонок обертання. У цих роботах цільовою функцією є

вартість конструкцій, а обмеження – умови міцності. Як параметр, що варіюється, прийнята стріла підйому. У роботах П. М. Варвака, А. С. Дехтяря, Л. Б. Котовий, Х. П. Узакова розглядаються покриття у вигляді металевих куполів. Для цих конструкцій як цільову функцію обрано масу конструкцій.

Завдання оптимізації трикутної геометричної мережі на сфері за критерієм мінімуму типорозмірів елементів також ставилося багатьма авторами різних систем сферичної розрізки. У всіх випадках рішень знаходилася одна або кілька схем розрізок сфери з використанням, в основному, осей симетрії у вигляді головних ліній (ліній великих кіл сфери), ліній паралельних перерізів сфери, а також сумісності частин граней правильних багатогранників. Так Міряєв Б. В. та ряд вчених Пензенського архітектурно-будівельного університету запропонували ітераційну оптимізацію схем сітчастих куполів, утворених на основі ікосаедра [22].

Теореми з доказами оптимального розташування сферичних чотирикутників запропоновано ще давньоіндійських трактатах. Сферичний шестикутник, вписаний в коло, можна представити як два чотирикутники із заданими сторонами і він має максимальну площу тоді, коли вписаний у коло. Цей напрямок активно розвивається рядом зарубіжних учених.

Про оптимальне розташування шестикутників, вписаних у колі на опуклій поверхні, виходячи з критерію мінімальних довжин елементів, говорять твердження та докази угорського вченого – доктора Ф. Тота. У роботі він наводить варіанти оптимального заповнення поверхонь колами [43]. Оптимізація купольних конструкцій розглядалася у відомому довіднику «Сучасні просторові конструкції». Автор розділу Е. З. Жуковський приймає як цільову функцію наведені витрати. Аналітична апроксимація цільових функцій дає змогу визначити мінімум однопараметричних функцій методами класичної математики. Накладаючи при цьому обмеження на деформативність конструкції, автор вирішує умовно екстремальну задачу знаходження оптимальних значень цільових функцій та керованих

параметрів виходячи з умов міцності та деформативності споруди.

На основі аналізу розрахункових схем сітчастих куполів В. А. Савельєвим виконані діаграми рівноважних станів при різних комбінаціях нерівномірності завантаження вузлів та початкових недосконалостей форми. Виявлено вторинні точки, пов'язані зі стрибкоподібною зміною характеру деформування та виникненням кососиметричних форм втрати стійкості. Було підтверджено наведене в роботі висловлювання .С.Вольміра про те, що шляхом створення штучних початкових відхилень вузлів від ідеальної сферичної форми у напрямі, що відповідає передбачуваному витріщенню або протилежному, може бути досягнуто суттєве збільшення критичних навантажень. Запропоновано методику, що дозволяє проводити перевірку стійкості шарнірно-стрижневих оболонок з урахуванням як початкових відхилень вузлів, так і прогинів стрижнів. Головною особливістю поведінки стислих стрижневих систем при великих переміщеннях є неоднозначність рішень. При двох ступенях свободи і одному параметрі переміщення, що варіюється, встановлена можливість виникнення одночасно трьох форм рівноважних станів. Відзначено, що при переході до розрахункової схеми реальної конструкції та збільшення кількості незалежних параметрів у десятки та сотні разів аналіз форм рівноваги систем значно ускладнюється.

1.4. Теоретичні дослідження збірних сферичних оболонок

Завдання оптимізації трикутної геометричної мережі на сфері за критерієм мінімуму типорозмірів елементів ставилося багатьма авторами різних систем сферичних розрізків [15, 31]. з використанням, в основному, осей симетрії у вигляді головних ліній (ліній великих кіл сфери), ліній паралельних перерізів сфери, а також сумісності частин граней правильних багатогранників. Різні математичні школи [22, 16.] довели, що оптимальною трикутною мережею на площині є мережа з рівносторонніх трикутників, які комбінуються в різні поєднання правильних шестикутників, які, у свою чергу

, можуть бути описані мережею перетинаються кіл (охоплені всі трикутники) або стосуються кіл. Також було доведено, що якщо між такими системами на площині та іншій поверхні існує проєкційний зв'язок, то спроектована трикутна мережа також буде оптимальною за критерієм довжин сторін трикутників.

Вочевидь, що розміщення сфері правильних і неправильних шестикутників, вписаних у колі, тобто. фігур плоских або шестикутників (пірамід), складених у свою чергу із плоских трикутників з мінімальними розмірами ребер, дає оптимальне рішення трикутної мережі на сфері. До того ж така мережа утворена з урахуванням кіл мінімальних радіусів, тобто. кіл на сфері, отриманих при торканні трьох суміжних кіл, центри яких знаходяться на найменшій відстані один від одного.

Сферичний шестикутник можна представити як два чотирикутники із заданими сторонами і він має максимальну площу тоді, коли вписаний в коло. Шестикутні панелі, вписані в кола з мінімальними радіусами (тобто що стосуються), матимуть мінімальні розміри і максимальні площі при заданому числі граней трикутної мережі сфери. Т. е. елементи мережі у вигляді радіусів матимуть мінімальну довжину, оскільки є найкоротшими відстанями між центрами кіл, а контури, вписані в кола, також матимуть мінімальні розміри. Утворення правильних шестикутників в цій мережі можливе як окремий випадок. Таким чином, для кожного варіанту розрізання оптимальне рішення по мінімуму матеріалу (довжини елементів) - це розміщення шестикутників, вписаних в кола, причому в першому оптимальному варіанті суміжні три кола торкаються один одного. Оптимізація трикутної геометричної мережі на сфері за критерієм мінімуму типоразмерів елементів може бути представлена розміщенням в системі неправильних шестикутників, вписаних в кола мінімальних розмірів, максимуму правильних шестикутників, наприклад, в сумісних сферичних трикутниках (сегментах) з радіально кільцевою основою, в секторах з однією вершиною в центрі; а також в сумісних сферичних трикутниках (сегментах) правильних

многогранників (ікосаедра, октаедра і тетраедра) з використанням всіляких опорних мереж для центрів кіл і з схемами розрізань

Окрім варіантів застосування властивостей симетрії головних і паралельних ліній кіл сфери, в подібних розрізаннях мають бути реалізовані можливості центральної симетрії кіл [31] і ефективній опорній мережі центрів кіл.

1.5. Перспективні сітчасті збірні оболонки з плоскими шестикутними, трикутними панелями та N-вугільними панелями

У практиці будівництва є численні приклади застосування для пологих куполів, в основному, систем сферичної розрізки Шведлера, Чивітта, правильної мережі Чебишева, а також комбінованої розрізки зі сферичних секторів і сегментів з утворенням максимального числа плоских шестикутників. Недоліком всіх їх є переважно поелементне виготовлення конструкцій, неможливість, як правило, укрупнювального складання та застосування переднапруги. Майже всі розрізки Шведлера, Чивітта і Чебишева мають певну залежність числа типорозмірів ребер трикутної мережі від числа членувань та відносну простоту геометричної побудови. Але необхідно мати на увазі, що сучасні програмні засоби дозволяють ставити завдання оптимізації, починаючи від формоутворення з можливостями 3D-проекування та завершуючи сферою високих технологій виготовлення та зведення покриттів та будівель загалом. Для початку у вигляді оптимізаційної задачі можна було б уявити залежності числа типорозмірів ребер трикутної мережі на сфері від числа та способу членування в розрізках, знаючи, що найпростіші методи розбиття сфери трикутною та шестикутною мережею ведуть до можливого спрощення наступних завдань будівництва. Однак прості методи на стадії формоутворення можуть призводити до неефективних конструктивно-технологічних рішень на стадії зведення конструкцій. У цій роботі

запропоновано формування трикутної мережі на купольній сфері шляхом утворення правильних та неправильних плоских шестикутників або пірамідальних шестикутників із плоскою основою у пірамід. Чим більше правильних шестикутників, тим оптимальніша трикутна мережа за критерієм мінімуму довжин елементів, за простотою конструкції та технологічності рішень. [31, 24, 16].

Таким чином, оптимальне рішення по мінімуму довжини елементів (приблизно - ваги), - це мережа з трикутників, що утворюються з шестикутників, вписаних в коло, причому кожен суміжні три кола стосуються один одного на найкоротшій відстані. Такими якостями володіють одноярусні сітчасті бані Туполева (на основі усіченого ікосаедра у вигляді кристалічної мережі) і Фуллера (на основі мережі додекаедра). Однак, при детальному порівнянні типорозмірів очевидно, що розрізка сфери на основі мережі Фуллера має меншу кількість типорозмірів, отримані методом трелатації.

1.6 Висновок по роздіу 1:

1) У закордонному будівництві купольних конструкцій найбільшого поширення набули сітчасті та геодезичні металеві та дерев'яні куполи, що пов'язано із застосуванням спеціального обладнання.

2) У вітчизняному будівництві купольних конструкцій вкрай рідко застосовуються сітчасті та геодезичні куполи, однак у практиці будівництва останнього періоду перевага надається ребристим і ребристо-кільцевим куполам з гратчастими зв'язками, виготовлення яких не вимагає спеціального обладнання, що відрізняється від обладнання для виготовлення традиційних площинних конструкцій.

3) Здійснені сферичні оболонки в основі геометричної побудови каркаса мають дві групи розбивок поверхонь з використанням меридіонально-кільцевої схеми та геометрії правильних багатокутників.

Набутий досвід формоутворення сітчастих поверхонь дає можливість ставити завдання оптимальних або раціональних конструктивно - технологічних рішень сферичних оболонок, а також їх теоретичне обґрунтування.

4) Шляхом вивчення найбільш перспективних розбивок сфери та визначення мінімуму типорозмірів для сітчастого купола було встановлено, що системоутворююча розбивка Фуллера на основі описує додекаедра сферою і подальшому дробленні на однакові сферичні рівнобедрені трикутники має мінімум типорозмірів і вузлових з'єднань Чебишева та Туполева. Тим самим збільшується швидкість виконання робіт з укрупнювального складання та монтажу купольної конструкції, зменшення трудовитрат і витрат на будівельну техніку.

РОЗДІЛ 2

ОБЛАСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Принцип розрахунку сітчастих куполів по безмоментной теорії

Сітчастий купол розглядають як суцільну осесиметричну оболонку. Розрахунок виконується за “безмоментною” теорією. Потім здійснюється зворотний перехід до зусиль дискретної системи. При розрахунку визначають жорсткісні властивості еквівалентної суцільної оболонки, що має ту ж міцність на розтяг, вигин та кручення, що і задана сітчаста система. Переміщення точок суцільної оболонки збігаються із переміщеннями її вузлів. Перехід від отриманих напруг у суцільній оболонці до зусиль у стрижневій сітчастій системі ґрунтується на умовах статичної рівноваги. Навантаження та зусилля в куполі наведено на рис 2.1.

Як відомо безмоментна теорія оболонок є спрощеним варіантом загальної теорії, в якому нехтують впливом згинальних і крутних моментів, а також поперечних сил на напружено-деформований стан.

Для того, щоб існував безмоментний напружений стан, необхідні такі умови:

1. Оболонка повинна мати форму безперервної поверхні, що плавно змінюється, з постійною або плавно змінною товщиною h . Різка зміна зазначених величин створює різницю у деформаціях та викликає вигин. У місцях різкої зміни геометрії оболонки (стрибка) величини переміщень, що визначаються за безмоментною теорією, зазнають розриву.

2. Навантаження на оболонку має бути плавним і безперервним. Безмоментна оболонка не може працювати на зосереджену силу, перпендикулярну до її поверхні.

3. Закріплення країв оболонки має бути таким, щоб її край міг вільно переміщатися за нормаллю. Кути повороту та нормальні переміщення на краях оболонки не повинні бути обмежені.

4. Сили, що додаються до краю оболонки, повинні лежати в дотичній площині.

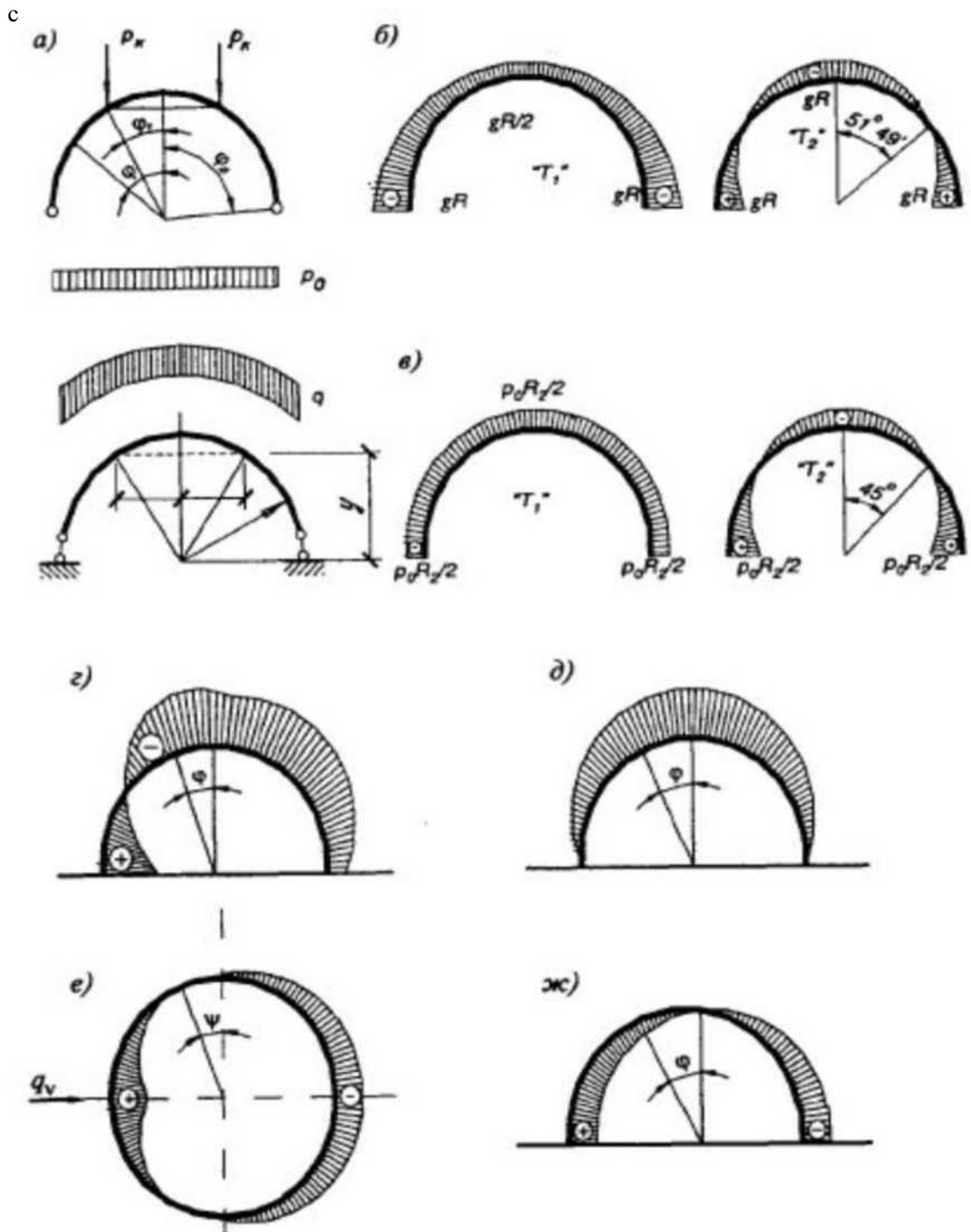


Рисунок 2.1 - Навантаження та зусилля в куполі-сітчастому:

а - розрахункова схема; б - епюри меридіональних та кільцевих зусиль від власної ваги куполу; в - те від снігового навантаження; г, е - епюри вітрового тиску на кут ψ в поперечному перерізі та в плані; д, ж - симетрична та косиметрична епюра вітрового тиску на купол

У цілому нині ці вимоги означають, що у оболонці має бути ліній спотворення. На околиці кожної з ліній спотворення виникатиме т.зв. крайовий ефект, і лише на деякій відстані від лінії спотворення можна вважати ПДВ безмоментним.

За наявності ліній спотворення безмоментна теорія застосовується за умов:

1 . Лінії спотворення утворюють густу сітку, тобто. крайові ефекти від сусідніх ліній нічого не винні накладатися друг на друга.

2 .Лінії спотворення не повинні стосуватися т.зв. асимптотичних ліній, тобто. таких, кривизна яких дорівнює нулю (наприклад, для циліндра та конуса це прямі вздовж утворюють).

Етапи розрахунку оболонки з безмоментної теорії :

1. Визначаються зусилля із рівнянь рівноваги.
2. Визначаються деформації із фізичних співвідношень.
3. Визначаються переміщення.

Основні формули для статичного розрахунку панелей сітчастого купола.

Основні формули для статичного розрахунку стрижнів і вузлів сітчастого купола за безмоментною теорією:

- 1) Визначаємо зусилля в куполі від власної ваги і покрівлі.

$$N_1 = \frac{R_q}{1 + \cos\varphi},$$

$$N_2 = -R\cos\varphi - N_1,$$

$$N_{12} = 0,$$

де N_1 - зусилля в оболонці у напрямку меридіана на одиницю довжини кільцевого перерізу; N_2 – кільцеве зусилля на одиницю довжини меридіана; N_{12} - зрушує зусилля; φ - змінний кут у меридіанальному перерізі оболонки, що звітує від осі обертання; R – радіус сфери (25 м); q - розрахункове

навантаження від власної ваги та покрівлі куполу.

2) Визначаємо зусилля в куполі від одностороннього завантаження сніговим навантаженням виходячи з її застосування по нормалі до поверхні куполу.

$$N_1 = 0,4SR \left[\frac{1}{2} + \frac{\cos\varphi}{3\sin^3\varphi} (2 + \cos\varphi)(1 - \cos\varphi)^2 \sin\Psi \right]$$

$$N_2 = 0,4SR \left[\frac{1}{2} + \left(\sin\varphi - \frac{\cos\varphi}{3\sin^3\varphi} (2 + \cos\varphi)(1 - \cos\varphi)^2 \right) \sin\Psi \right]$$

$$N_{12} = \frac{-0,4PR}{3} \frac{(2 + \cos\varphi)(1 - \cos\varphi)^2}{\sin^3\varphi} \cos\varphi$$

$$S = 0,4S_0(1 + \sin\varphi \sin\Psi)$$

де S_0 - навантаження на одиницю площі горизонтальної проекції куполу;

P - навантаження на одиницю площі горизонтальної поверхні,

Ψ - кут широти в плані нижнього кола сферичного купола, що відраховується від діаметра, перпендикулярного до вітру.

3) Визначаємо зусилля в куполі від симетричного завантаження сніговим навантаженням.

$$N_1 = -0,5SR, \quad N_2 = 0,5SR \cos 2\varphi, \quad N_{12} = 0,$$

μ - визначуваний по додатку б.2

Кільцеве зусилля міняє знак при $\varphi = 45^\circ$

4) Визначаємо зусилля в стержнях куполу.

Встановлюємо зв'язок між куполом-оболонкою і сітчастим куполом, перетворюючи поля безмоментної оболонки так, щоб одна вісь була паралельна до однієї з осей решітки. Тоді зусилля у стрижнях визначаються за такими формулами:

$$P_1 = \frac{l}{2\sqrt{3}}(3N_2 - N_1); \quad P_2 = \frac{l}{\sqrt{3}}(N_1 - \sqrt{3}N_{12}); \quad P_3 = \frac{l}{\sqrt{3}}(N_1 - \sqrt{3}N_{12}).$$

5) Визначаємо зусилля в куполі від дії вітрового навантаження, яке прикладене по нормалі до поверхні куполу

$$N_1 = 0,5W_0R; N_2 = 0,5W_0R; N_{12} = 0; W = W_0\sin\varphi\sin\varphi$$

де W_0 - тиск вітру на вертикальний майданчик, перпендикулярно його напрямку (при $\varphi = \Psi = 90^\circ$).

б) Перевірка стійкості окремих елементів куполу і сферичної оболонки в цілому

Зусилля стискування у верхньому кільці куполу від сумарної дії навантаження не повинні перевищувати критичного зусилля:

$$N_k = T_1 r_k \cos\varphi_k \leq \frac{3E_k I_k}{r_k^2}$$

де E_k , I_k , r_k - модуль пружності матеріалу, момент інерції відносно вертикальної осі і радіус кільця.

Стійкість сферичної оболонки перевіряють по критичній напрузі:

$$\sigma_{cr.ob} = \frac{E_{ob} t_{ob}}{R \sqrt{3(1 - \mu_{ob}^2)}} \geq \sigma_{max}$$

де t_{ob} - товщина оболонки;

E_{ob} , μ_{ob} - модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу оболонки;

σ_{max} - сумарна стискаюча напружка від усіх видів завантаження.

Для сітчастих куполів рекомендуються наступні формули переходу до суцільних куполів:

- для одношарового куполу

$$E_{ob} = \frac{EA}{3il}$$

$$t_{ob} = 2i\sqrt{3}$$

$$\mu_{ob} = \frac{1}{3}$$

де $E I$ – згинальна жорсткість, ν – коефіцієнт Пуассона, A – площа перерізу, J – радіус інерції, l – довжина стрижня стисненого купола

Максимальні зусилля у стрижнях сітчастого сферичного купола з трикутними осередками розраховуються за такою формулою:

$$N = kgRl,$$

де k - Коефіцієнт, що визначається за табл. 2.1 залежно від кутової координати стрижня φ , що відраховується від вертикальної осі;

g - розрахункове рівномірно-розподілене навантаження;

R - радіус кривизни поверхні, що визначається за формулою

$$R = \frac{D^2 + 4f^2}{8f}$$

(тут D і f - діаметр і висота підйому купола); l -довжина стрижня купола..

Таблиця 2.1 - Значення коефіцієнта k

φ	Навантаження					
	Постійна		Снігова		Вітрова	
	Стискування	Розтягування	Стискування	Розтягування	Стискування	Розтягування
0	-0,298	-	-0,298	-	-0,257	+0,94
15	-0,31	-	-0,31	-	-0,27	0,94
30	-0,37	-	-0,36	-	-0,29	0,94
45	-0,47	0,06	-0,43	0,15	-0,29	0,94
60	-0,63	0,34	-0,58	0,56	-0,30	0,94
75	-0,56	0,69	-0,33	0,56	-0,63	0,71
90	-0,62	1,15	-0,31	0,48	-0,53	0,74

Розрахункова довжина стислого стержня куполу :

$$l_{ef} = \mu l$$

де l - геометрична довжина, що дорівнює відстані між вузлами;

μ - коефіцієнт вільної довжини, що визначається за графіком (рис.2.2)

залежно від параметра умовної довжини стрижня

(тут R - радіус кривизни поверхні, i - радіус інерції в радіальній площині).

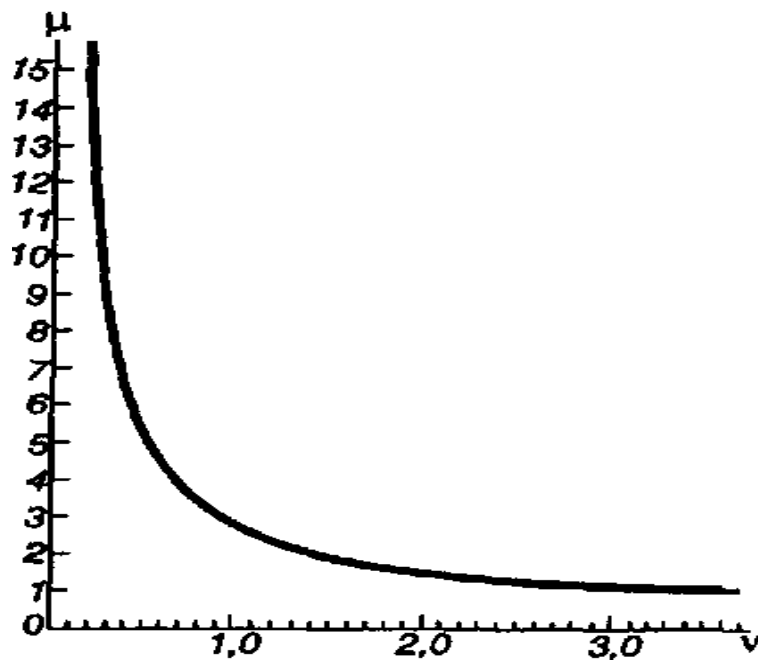


Рисунок 2.2 - Залежність коефіцієнтів вільної довжини стрижнів сітчастого бані p від параметрів умовних довжин ν

При $\nu > 3$ коефіцієнт вільної довжини дорівнює 1. Це означає, що за відповідних співвідношеннях кривизни поверхні, згинальної жорсткості стрижня та його довжини кожен вузол є абсолютно жорсткою опорою.

2.2 Дослідження напружено-деформованого стану геодезичних куполів-оболонок

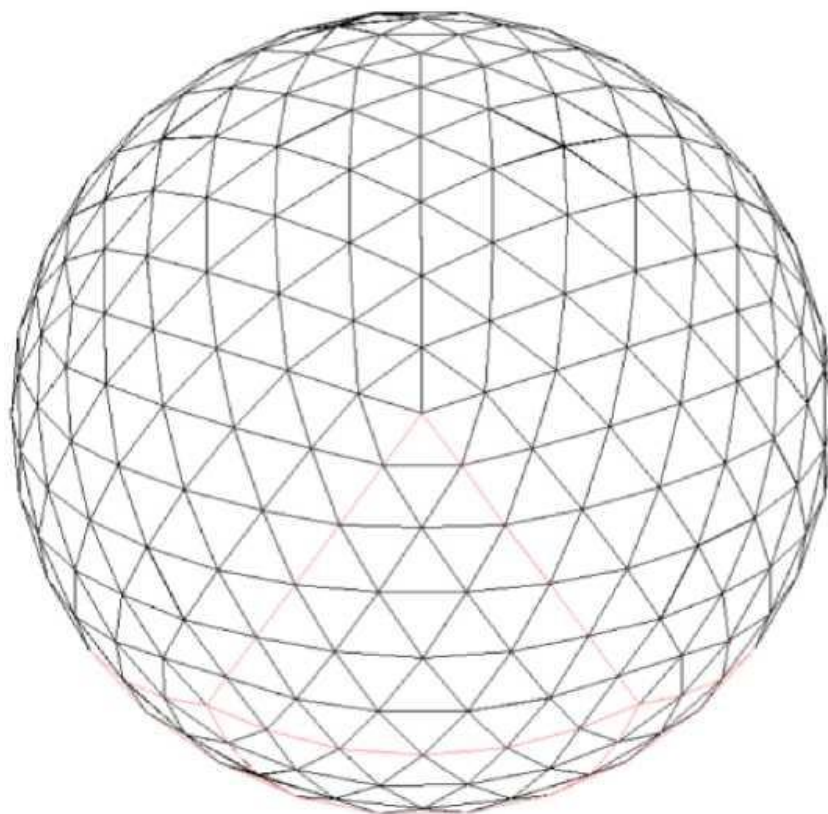
Можливості пропонуваніх збірних панельних або пірамідально-каркасних геодезичних куполів-оболонок дозволяють ефективно розв'язувати

задачі проектування потрощених конструкцій покриттів будівель. Зібрані з укрупнених елементів - панелей купола-оболонки мають підвищену жорсткість і це забезпечує їхню загальну та місцеву стійкість. Однак включення прорізів, розрідження несучих елементів ускладнює роботу геодезичного купола і робить цю систему наскрізною сферичною стрижневою оболонкою.

Пропоновані нижче конструктивні рішення куполів-оболонок на основі нових розрізок, представлених в роз. 1 можуть бути використані при створенні однопоясних оболонок, що виготовляються з різних матеріалів. Зазвичай однопоясні оболонки застосовуються при невеликих і середніх прольотах, що перекриваються. Крім того, на конструкції оболонок впливають функціональні призначення будівель, які можуть бути опалювальними або неопалювальними, стаціонарними або тимчасовими, а також особливості їх навантаження, тобто необхідність сприйняття зосереджених навантажень, що до них підвішуються. Зазначимо, що конструкції збірних оболонок на основі розрізок Фуллер можуть виготовлятися з різних матеріалів. У цій роботі передбачено застосування залізобетонного, сталевих та дерев'яного матеріалу.

Для оцінки запропонованих конструктивно-технологічних рішень проведено аналіз проектування сталевих куполів невеликих прольотів із співвідношеннями стріли підйому до прольоту понад 0,5-0,6 особливо затребуваних для допоміжної забудови. Але багато висновків можуть бути застосовані й для споруджених куполів найбільш ефективних прольотів від 30 до 100 м. Розроблені бані-оболонки мають запропоновані в розділі 1 розрізки на основі геодезичного 320-гранника за наведеною класифікацією 20ТАТ320 [33]. При проектуванні купола з сталевих пірамідальних каркасних панелей повинні бути визначені значення геометричних відхилень і параметрів геометрії конструкції при розрахунку за деформованою схемою, а також завдання теоретичної оцінки величини критичного вузлового навантаження. Також необхідно мати на увазі, що при складанні купола є можливість

сортування вже виготовлених деталей за розмірами для збирання укрупнювальної панелей і потім сортування самих панелей для їх розміщення в системі покриття. Це вже природним способом дозволяє зробити раціональне розкладання панелей з урахуванням деформованих схем покриттів. За допомогою сортування та дзеркального укрупнювального складання панелей можна подолати вплив недосконалостей на формування початкових форм втрати стійкості геодезичного купола. У геодезичних куполах пропонувані розрізки є можливість такого розміщення неправильних шестикутників і правильних п'ятикутників, коли забезпечується зменшення не тільки числа типорозмірів елементів, а й числа типорозмірів опорних вузлів, за рахунок їх пристрою на одному рівні нижче або вище екватора, як показано на рисунку 2.3. Розрізання такого купола має 9 типорозмірів стрижнів, 3 типорозміри монтажних елементів та п'ять симетричних типорозмірів опорного вузла (див. рис. 2.3).



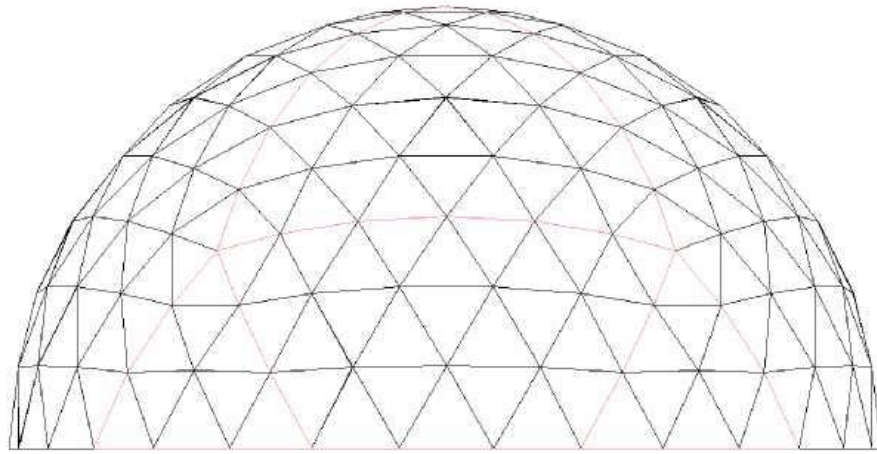


Рисунок 2.3- Схема каркасу покриття на основі 320 - граника, має 5 типорозмірів монтажних несучих елементів: а - вид зверху; б – вид зверху.

Для забезпечення надійності збірних геодезичних куполів приймаємо різні варіанти шарнірних з'єднань та варіанти жорстких вузлових з'єднань між панелями та всередині панелей. Ці з'єднання повинні забезпечити необхідну монтажну жорсткість як окремих каркасних панелей-пірамід, так і монтажних частин купола при складанні та встановленні його в проектне положення [34].

2.3 Дослідження конструктивно-технологічних рішень геодезичних куполів

Важливою особливістю збірних геодезичних куполів з панелей є наявність як мінімум двох варіантів панелей: шестикутної та п'ятикутної (для октаедра розрізки застосовується чотирикутна панель). Тому конструктивні рішення цих панелей можуть суттєво ускладнюватись. Для виготовлення панелей необхідні різні стенди або ці стенди можуть переналагоджуватися під інші кути та розташування елементів. Перший варіант вузлових рішень панелей збірних сферичних куполів пропонує розрізок відрізняється винятковою простотою у виготовленні та складанні. Вузли однопоясного бані, що збирається з монтажних панелей у вигляді правильних п'ятикутників і шестикутників, збільшують монтажну жорсткість при складанні, і дозволяє

збирати швидко і надійно невеликі куполи ручного збирання з прольотами до 12 м і спрощують монтаж високих куполів великих прольотів [35].

Купол збирається з укрупнених елементів, які, у свою чергу, збираються з проектного матеріалу. Для створення компактного вузла торці стрижнів сплющуються з перегином, через що у елементів утворюється потонання, полегшується з'єднання елементів під кутами 50-72 градуси та зменшується вузловий елемент.

В наш час розроблено безліч різновидів вузлових елементів (конекторів) різної форми та виконання, але як правило вузли виготовляються їх металу, це обумовлено здатність металу витримувати значні навантаження та зручний при монтажі. Вузлові елементи виконуються як у болтовому з'єднанні, і із застосуванням зварювання.

У разі застосування зварювання необхідно суворо виконувати вимоги проекту щодо зварювальних матеріалів, дотриманням режимів зварювання, проводити візуальний та вимірювальний контроль, суворо стежити за геометричними розмірами та кутами повороту від осі обертання. У разі зварного з'єднання стрижнів з конекторами на будівельному майданчику значний ризик відхилення від осі стрижня, що у свою чергу призведе до відхилення від осі сфери окремих елементів. Як наслідок наступні монтажні з'єднання не збігатимуться по осі з конектором, або змістяться щодо вузла, тим самим складання наступного вузлового з'єднання буде неможливим. Застосування зварювання можливе лише для металу та залізобетону. Оскільки вищезгаданий процес потребує досвіду і великої трудомісткості, застосування його на будівельному майданчику не рекомендується.

При застосуванні болтового з'єднання в опорному вузлі виникає ризик усунення отвору від осі конектора. У свою чергу це призведе до додаткової похибки при монтажі вузлових елементів і як наслідок збільшення зусиль у стрижнях не передбачених при розрахунках, а також інші елементи конструкцій можуть зазнати руйнування через перерозподіл зусиль і зміну роботи конструкції. Таким чином, створення зусиль при неправильному

монтажі може призвести до зміни розрахункової схеми і виникнення додаткових сил кручення.

Для дерев'яних куполів невеликого діаметру (до 6 метрів) можуть бути використані безконекторні з'єднання. Як вузлове з'єднання служать спарені стрижні та неспарені стрижні. Сполучні стрижні підганяються в монтажний вузол і кріпляться цвяхами. Даний тип з'єднання не застосовується у промисловому та цивільному будівництві, але знайшов своє поширення в малоповерховому будівництві при зведенні будівель з низьким рівнем відповідальності (невідповідальні конструкції).

Монтаж залізобетонного бані має свої особливості щодо дерев'яних і металевих. З'єднання вузлів виходять жорсткі, це обумовлено застосуванням зварювання та замонолічування заставних деталей. Армування купола виконується відповідно до розрахункових зусиль та отриманих результатів розрахунку. Стрижні пологих та непологих куполів, за винятком приопорних зон, стиснуті; їх армують конструктивно одиночною сіткою зі стрижнів діаметром 5-6 мм з кроком 15-20 см. У опорного контуру ставлять додаткову меридіональну арматуру для сприйняття опорного моменту і додаткову арматуру кільцеву для сприйняття місцевих розтягуючих кільцевих зусиль. Робочу арматуру опорного кільця, що розраховується на центральне розтягування, ставлять у вигляді кільцевих стрижнів діаметром 20-30 мм, які з'єднують зварюванням.

У наші дні набули поширення куполи зі збірних залізобетонних елементів. Збірні бані, отримані розрізанням оболонки на криволінійні та плоскі елементи. Ребристі сегментні криволінійні елементи куполів спираються на опорне кільце і верхнє кільце, що підтримується часовою стійкою.

Купол сітчасті, що складаються із збірних трапецієподібних криволінійних або плоских ребристих панелей, збирають без лісів із застосуванням вантажопідйомних механізмів. Панелі з'єднують з опорним кільцем і між собою зварюванням металевих закладних деталей, стежачи за

дотриманням геометрії.

Опорне кільце виконують із монолітного залізобетону, а решту збирають із готових ступінчастих панелей. При монтажі бані на внутрішній виступ монолітного опорного кільця краном встановлюють окремі ступінчасті панелі, які тимчасово кріплять болтами до виступу кільця до замикання. Потім перевіряють відповідність геометричних розмірів і зварюють заставні деталі, після приймання вузла замонолічують стики. Збірні панелі другого кільця укладають на консольні виступи першого кільця та повторюють процедуру.

Технологія монтаж металевого та дерев'яного купола за своїм складом однакова, різниця полягає тільки в особливостях будови застосовуваного матеріалу та типу застосовуваного конектора у уловому з'єднанні. За принципом виготовлення напівфабрикати можуть бути двох виконань:

У першому випадку вузлові з'єднання зазвичай виготовляються за кресленнями КМ в заводських умовах під суворим дотриманням геометричних параметрів. На місце виконання робіт надходять вже готові конектори, промарковані по кутових типорозмірах із зазначенням умовного позначення місця кріплення стрижня та в заводському антикорозійному захисті. Типові елементи сітчастих куполів так само виготовляються в заводських умовах, маркуються за умовними позначеннями (наприклад, А, В, С), на елементи наноситься антикорозійний захист, проходить контроль якості, сортується по складальним маркам і вирушає на місце виконання робіт.

При вступі на будівельний майданчик дані матеріали сортуються за вимогами правил складування будівельних матеріалів. Укладаються на інвентарні підкладки на кшталт стрижнів не змішуючи відправні марки. Конекторні з'єднання укладаються за тими самими вимогами, але, як правило, на місце виконання робіт надходять у заводській тарі і не вимагають сортування.

Ускладнювальне складання ведеться залежно від місця та зони

монтажу. Вона може бути як на окремому майданчику, так і безпосередньо монтуватися на готове опорне кільце. Залежно від маси елементів із застосуванням вантажопідйомних споруд та (або) механізмів, а так само без застосування спеціальних пристроїв, тобто вручну.

У другому випадку вузлові з'єднання та типові елементи сітчастих куполів виготовляються в заводських умовах за кресленнями КМ під суворим дотриманням геометричних параметрів. Всі елементи конструкції маркуються, на них наноситься антикорозійний захист і всі вироби проходять процедуру, яка підтверджує якість виготовлення.

Після процедури приймання маркуються за умовними позначеннями (наприклад, А,В,С), на елементи наноситься антикорозійний захист, проходить контроль якості, сортується за збірними марками і відправляється на місце дозбирання на заводі-виробнику. Процедура досборки включає складання окремих елементів на панелі або сегменти купольної конструкції. Надалі кожен зібраний елемент маркується відправною маркою та доставляється на місце виконання робіт.

При вступі на будівельний майданчик вироби сортуються за вимогами правил складування будівельних матеріалів. Укладаються на інвентарні підкладки за відправними марками.

Складання ведеться безпосередньо на готове опорне кільце із застосуванням вантажопідйомних споруд та (або) механізмів.

Другий спосіб є простішим і менш трудомістким. Він не вимагає додаткових витрат, проте може вимагати застосування автомобільних кранів високої вантажопідйомності. Вибір того чи іншого способу складання та монтажу залежить від маси застосовуваного матеріалу та доцільності використання техніки високої вантажопідйомності.

Покриття для сітчастих куполів трикутної та трапецієподібної форми зі зрозумілих причин доцільно виготовляти у заводських умовах. Виготовлення покриття проводиться на основі теплотехнічного розрахунку та креслень КМД. Трикутні плити покриття можна виготовити і на будівельному

майданчику, за якістю виготовлення вони практично не відрізнятимуться від плит покриття виготовлених у заводських умовах, проте це вимагатиме додаткових людських та можливо вантажопідйомних ресурсів. Трапецієподібні плити покриття на будівельному майданчику виготовляти не рекомендується через велику трудомісткість. Плит покриття можуть бути змонтовані на сегменти на заводі-виробнику, або після збирання купольного каркаса.

Опорне кільце виготовляється із збірного залізобетону, монолітного залізобетону та металу. Для залізобетонного бані зазвичай застосовується монолітний залізобетон і збірний залізобетон. При проектуванні та монтажі опорного кільця необхідно дотримуватись геометричної послідовності монтажу заставних деталей. Відхилення від проектного становища заставних деталей не допускається.

Для металевого та дерев'яного бані може застосовуватися опорне кільце з усіх видів матеріалу. Залежно від типу та розмірів купольної конструкції з деревини може застосовуватися опорне виконане з дерева, даний тип опорного кільця зазвичай застосовується при будівництві невідповідних будов. У промисловому та цивільному будівництві вибір матеріалу для опорного кільця обумовлений конструктивними особливостями та застосовуваним матеріалом будівлі.

2.4 Короткі відомості про застосовані матеріали в сітчастих купольних конструкціях

Одним з найстародавніших будівельних матеріалів є деревина. Піломатеріали виготовляються з хвойних та листяних порід. Кожен вид деревини має індивідуальні показники міцності та щільності. У будівництві застосовується хвойні породи деревини, такі як ялина, кедр та сосна, це зумовлено великому поширенню цих порід деревини. З листяних порід зазвичай застосовується дуб і береза, вони мають високі показники

розрахункового опору на стиск і вигин, але і при цьому мають високу щільність і трудомісткість в обробці. З усіх видів деревини автор виділяє модрину, яка має дивовижні властивості, при попаданні у вологе середовище, або перебуваючи у воді (наприклад палі дерев'яних мостів) з часом не піддається корозії (гниття), а навпаки, тільки набирають міцність, при цьому має високі показники теплопровідності, що не рекомендується при зведенні конструкцій, що захищають.

Порівняно недавно на російському ринку з'явилася клеєна деревина та деревина класу LVL. На відміну від цільної деревини має ряд істотних переваг за показниками міцності і є більш стійким до корозії, а також вогнестійкість. З негативних якостей можна відзначити, що в результаті застосування поліефірних смол, які є клеєм для волокон, виникає питання про екологічність даних матеріалів.

Випускається виробами (колода, брус, дошка) довжиною 6 метрів із цільної деревини. Для деревини класу LVL і клеєної деревини обмежень за довжиною продукції немає, проте довжина може бути обмежена довжиною борту транспортного засобу при перевезенні до місця складання та монтажу.

Вироби з деревини випускаються першого, другого та третього гатунку. Третій сорт застосовується в невідповідних конструкціях значних навантажень, що не зазнають, наприклад в дощато-щитовому настилі. Другий сорт деревини застосовують в елементах відповідальних конструкцій, що випробовують зусилля на розтяг, стиск та вигин. (Наприклад в покрівельних роботах при монтажі решетування). Деревина першого сорту застосовується у відповідальних конструкціях, що випробовують зусилля на розтяг, стиснення, вигин і кручення. Відмінною особливістю при розрахунках дерев'яних конструкцій за сортами є відмінності у розрахунковому опорі на стиск та вигин.

Дерев'яні конструкції розраховуються за двома групами граничних станів. До першої групи граничних станів входять розрахунки за несучою здатністю (на міцність і стійкість). Розрахунок по другій групі граничних

станів розраховуються за деформаціями і включає розрахунки на прогини і переміщення.

Щільність деревини, що застосовується в будівництві в залежності від породи та вологості, варіюється від 600 до 800 кілограм на метр кубічний.

Металеві конструкції застосовуються в купольних конструкціях у вузлових з'єднаннях, несучих елементах та опорних кільцях. Залежно від марки сталі володіють різними показниками розрахункового опору на стиснення, межі плинності і ударної в'язкості. Будівельні сталі діляться на леговані та вуглецеві. За марочною міцністю сталі діляться на розрахунковий опір на стиск (наприклад, С245 має розрахунковий опір на стиск 24МПА).

Відповідно до сортаменту металопрокату вироби випускаються довжиною 6 та 12 метрів залежно від товщини стінки та типу прокату. Щільність металу, що застосовується в будівництві, приблизно дорівнює 7,8 тонн на метр кубічний.

Металеві конструкції розраховуються за двома групами граничних станів. До першої групи граничних станів входять розрахунки за несучою здатністю (на міцність і стійкість). Розрахунок по другій групі граничних станів розраховуються за деформаціями і включає розрахунки на прогини і переміщення.

Збірні залізобетонні конструкції застосовуються в купольних конструкціях як несучі елементи стрижнів і плит покриття. Виготовляються зазвичай у заводських умовах із випуском арматури для з'єднання у вузлах, або з використанням заставних деталей. Для сітчастих куполів із залізобетону застосовують важкий бетон різних марок.

Бетони мають обов'язкове маркування М (марка бетону), С (клас бетону за міцністю на стиск та розтяг), F (коефіцієнт морозостійкості бетону - означає мінімальну кількість циклів повного заморожування та відтавання), W (коефіцієнт водонепроникності). При маркуванні бетонного або залізобетонного виробу марку міцності пишуть за класом бетону за міцністю на стиск та розтяг згідно таблиці співвідношення класів і марок при

стисканні для важкого бетону.

Арматура, що застосовується в сітчастих куполах, застосовується А400, діаметр і кількість стрижнів розраховується проектними організаціями.

Залізобетонні конструкції розраховуються за двома групами граничних станів. У першій групі граничних станів розрахунок ведеться на міцність (за несучою здатністю). Друга група граничних розраховується за придатністю до нормальної експлуатації, включає розрахунок на освіту, розкриття, закриття тріщин і за деформаціями.

Щільність важкого бетону становить від 2200-2500 кілограмів на метр кубічний.

При детальному вивченні та порівнянні вищезгаданих матеріалів автор дійшов висновку, що доцільність застосування того чи іншого виду будівельного матеріалу зумовлено показниками щільності, міцності та особливостей експлуатації.

2.5 Висновок по розділу 2:

1) При детальному дослідженні особливостей розрахунку безмоментної теорії було встановлено, що даний спосіб застосовується тільки для конструкцій з деревини і металу за умови дотримання шарнірного з'єднання вузлових елементів купола і вузла примикання каркаса купола до опорного кільця.

2) Опорне кільце, що передає основні зусилля, можуть бути виготовлені з монолітного, збірного залізобетону та металу тільки для куполів з деревини та металу. Для залізобетонного бані застосовується опорне кільце з монолітного та збірного залізобетону.

3) Для збільшення швидкості монтажу та зниження трудовитрат виготовлення елементів та складальних панелей купольної конструкції доцільно виконувати у заводських умовах.

4) Довжину стрижнів купола, що випускається за сортаментом,

доцільно приймати кратно шести метрів. Оптимальна довжина стрижня не повинна перевищувати трьох метрів, оскільки при збільшенні довжини стрижня навантаження на стрижні збільшується, що призводить до збільшення площі перерізу.

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК

3.1. Початкові дані для проектування

3.1.1. Загальні відомості про купольну конструкцію

В якості об'єкта дослідження обрано одноярусний, непологий сітчастий купол, системоутворюючий розбивки Фуллера на основі сферою, що описує додекаедра.

Діаметр куполу - 25 метрів.

Стріла підйому - 12,5 метрів.

Чистота розбиття - 6V.

Спосіб з'єднання стрижнів – конекторний.

Площа основи - 487,29м².

Площа покриття - 973,42м².

Сумарна довжина стрижнів - 1387,26 метрів.

Мінімальна довжина стрижня - 2.031 метра.

Максимальна довжина стрижня - 2.707 метра.

Типорозмірів стрижнів – 9.

Кількість типорозмірів трикутних граней – 6.

Кількість типів конекторів - 6

Збирання навантажень на стрижні купола виконується після теплотехнічного розрахунку огорожувальної конструкції (настилу).

Так як тимчасові навантаження для всіх видів покриття і матеріалу стрижнів будуть однакові, доцільніше провести всі необхідні обчислення до збору навантажень на плити покриття.

У цій роботі розглядається постійне навантаження від власної ваги ребер і плит покриття.

3.1.2 Розрахунок снігового навантаження

Снігове навантаження на купольну конструкцію являє собою розрахунок за трьома варіантами навантаження(рис. 3.1).

Для варіанту 1 :

$$S_o = C_e C_r \mu S_q = 0,72 * 1 * 1 * 2 = 1,42 \text{кНм}^2$$

S_o — нормативне снігове навантаження;

C_e — коефіцієнт, що враховує знос снігу з покриттів під дією вітру;

C_r — термічний коефіцієнт;

μ — коефіцієнт переходу від ваги снігового покриву землі до снігового навантаження на покриття;

S_q — нормативне значення ваги снігового покриву на 1м^2 горизонтальної поверхні землі;

$$C_e = 0,85 + 0,00375(d - 60) = 0,85 + 0,00375(25 - 60) = 0,72$$

Таблиця 3.1 - Ухил покриття

Ухил покриття α , град.	μ_1
$\alpha < 30$	1
$\alpha > 60$	0

Для варіанту 2:

$$\text{при } \alpha 45^0 \quad S_o = C_e C_r \mu S_q = 0,72 * 1 * 3,36 * 2 = 5,22 \text{кНм}^2$$

$$\mu_2 = C_{r1} (z/r_1)^2 \sin \beta = 19,4 (8,83/8,83)^2 \sin 170 = 3,36$$

$$\text{при } \alpha 60^0 \quad S_o = C_e C_r \mu S_q = 0,72 * 1 * 1,12 * 2 = 1,61 \text{кНм}^2$$

$$\mu_2 = C_{r1} (z/r_1)^2 \sin \beta = 19,4 (6,25/10,82)^2 \sin 170 = 1,12$$

$$C_{r1} = 2,55 - \exp \left(0,8 - 14 \frac{f}{d} \right) = 2,55 - 2,7182818284590452 * 08 -$$

$$14(12,5/25)=19,4$$

при $z > r_1\mu_3 = 1,5\sin\beta$, при $\alpha = 45^0$; $\mu_3 = 0$, при $\alpha > 60^0$.

Для варианту 3:

$$\text{при } \alpha 30^0 \quad S_0 = C_e C_r \mu S_q = 0,72 * 1 * 0,52 * 2 = 0,74 \text{ кНм}^2$$

$$\mu_2 = 3 \sqrt{\frac{2f}{d} \sin(3\alpha) \sin\beta} = 3 \sqrt{\frac{2*12,5}{25} \sin(3 * 30) \sin 170} = 0,52 \text{ кНм}^2$$

$$\text{при } \alpha 45^0 \quad S_0 = C_e C_r \mu S_q = 0,72 * 1 * 0,43 * 2 = 0,62 \text{ кНм}^2$$

$$\mu_2 = 3 \sqrt{\frac{2f}{d} \sin(3\alpha) \sin\beta} = 3 \sqrt{\frac{2*12,5}{25} \sin(3 * 45) \sin 170} = 0,43 \text{ кНм}^2$$

$$\text{при } \alpha 60^0 \quad S_0 = C_e C_r \mu S_q = 0,72 * 1 * 0 * 2 = 00 \text{ кНм}^2$$

$$\mu_2 = 3 \sqrt{\frac{2f}{d} \sin(3\alpha) \sin\beta} = 3 \sqrt{\frac{2*12,5}{25} \sin(3 * 60) \sin 170} = 0 \text{ кНм}^2$$

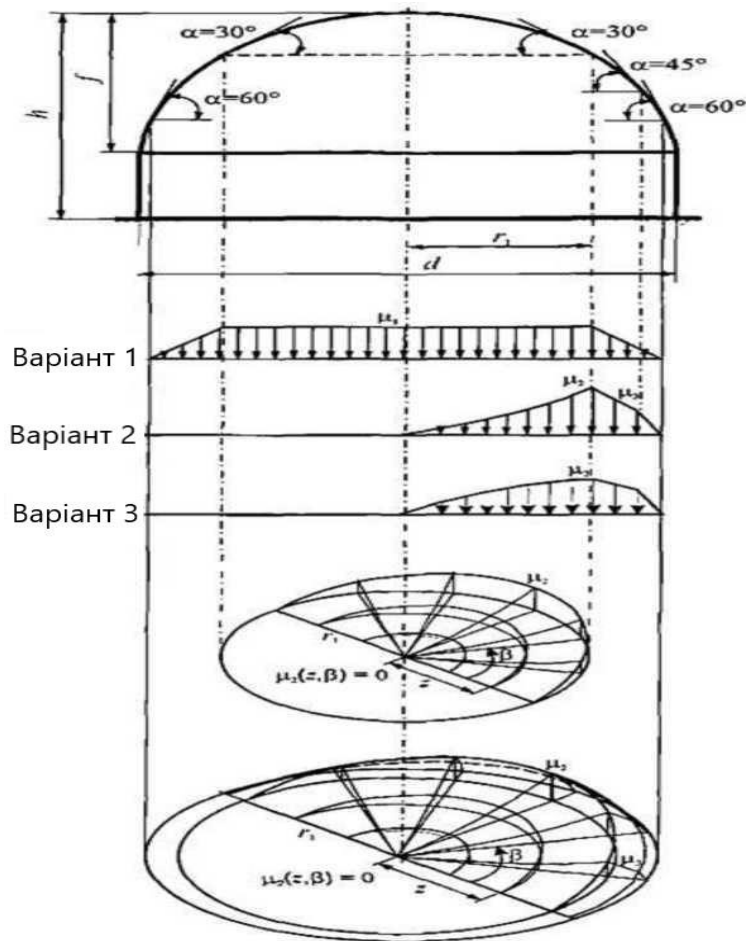


Рисунок 3.1 - Розрахункова схема для визначення коефіцієнта μ

3.1.3 Розрахунок вітрового навантаження

Нормативне вітрове навантаження на купол розраховується як добуток середнього вітрового навантаження та пульсаційного навантаження.

$$W_H = W_m + W_q = 0.168 + 0.135 = 0.303 \text{ кН}$$

W_H — нормативная ветровая нагрузка;

W_m — середнє вітрове навантаження;

W_q — пульсаційне вітрове навантаження;

$$W_m = W_o k c = 0.3 * 0.7 * 0.8 = 0.168 \text{ кН}$$

W_o — нормативне значення вітрового тиску;

k — коефіцієнт, що враховує зміну вітрового тиску для висоти Z ;

c — аеродинамічний коефіцієнт;

$$W_q = W_m \zeta (Z_B) v = 0.168 * 0.99 * 0.81 = 0.135 \text{ кН}$$

(Z_B) — коефіцієнт пульсації тиску вітру;

v — коефіцієнт просторової кореляції пульсацій тиску вітру;

$$W_P = W_H * y_w = 0.303 * 1.4 = 0.425 \text{ кН}$$

W_P — розрахункове вітрове навантаження;

y_w — коефіцієнт надійності по навантаженню тиску вітру;

3.2. Розрахунок куполу сітчастого з деревини

3.2.1. Розрахунок і конструювання клеєфанерний панелі

Розрахунок клеєфанерний панелі трикутної форми в плані із сторонами 2573x2708x2708 мм. Для розрахунку приймаємо настил розмірами в плані 902x2573 мм.

Каркас настилу виконуємо з соснових дощок ($\rho=500\text{кг/м}^3$) 2го сорту з розрахунковим опором сколюванню уздовж волокон при вигині $R_{ck} = 1,6$ МПа.

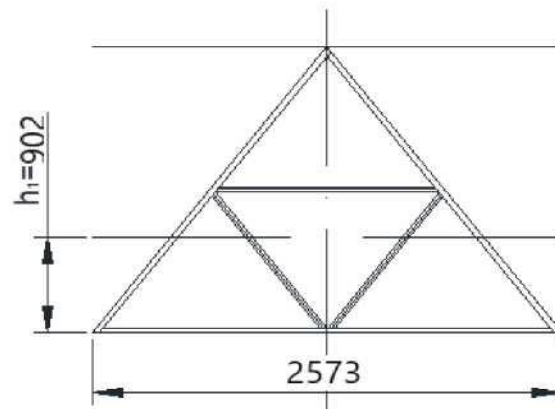


Рисунок 3.2 - Схема панелі.

Нижню обшивку приймаємо з фанери ФСФ сорту В/ВВ ($\rho=700\text{ кг/м}^3$) найменшої допустимої товщини із п'ятишарової товщиною 6 мм. Верхню із ОСП ($\rho=600\text{ кг/м}^3$) товщиною 8 мм.

Розрахункові характеристики фанери: $R_{ф.с.} = 12,5$ МПа; $R_{ф.м.}^{90} = 6,5$ МПа; $R_{ф.р.} = 14$ МПа; $R_{ск} = 0,8$ МПа.

Листи фанери стикуємо "на вус". Для стикування обшивок та їх кріплення до ребрів каркасу приймаємо фенолорезорциновий клей ФРФ-50.

Висоту ребер каркаса приймаємо $h = 16$ см. З урахуванням сортаменту дощок та їх острожки перетин ребер 50x160 мм.

Висота перерізу панелі: $h_{п}=160+6=166$ мм.

У цьому випадку $h/l = 166/2692 = 1/34$ - знаходиться в межах допустимих значень $h/l = 1/20...1/40$.

Як утеплювач приймаємо URSA GEO П-75 товщиною 150мм ($\rho=150\text{ кг/м}^3$). Пароізоляція ІЗОСПАН В. Покрівля - алюкобонд А2 (3мм).

Таблиця 3.2 – Збір навантажень на 1 погонний метр настилу

Вид навантаження	Нормативне навантаження, кН/м	Коефіцієнт надійності по навантаженню	Розрахункова навантаження, кН/м
Постійні:			
1) Алюкобонд	0,053	1,3	0,069
2) Обшивка нижня з фанери 6мм ($\rho=700 \text{ кг/м}^3$)	0,038	1,1	0,041
3) Обшивка верхня з ВІСПИ 8мм ($\rho=600 \text{ кг/м}^3$)	0,043	1,1	0,047
4) Ребра жорсткості і каркаса ($\rho=500 \text{ кг/м}^3$)	0,106	1,2	0,127
5) Пароізоляція ІЗОСПАН В ($m=0,0643 \text{ кг/м}^2$)	0,0005	1,2	0,0006
6) Утеплювач URSA GEO П- 75 (150мм)($\rho=150 \text{ кг/м}^3$)	0,202	1,2	0,242
Разом:	0,4425		0,5266
Тимчасова:			
1) Снігова	5,22	1,4	7,3
Всього:	5,66		7,82

Розрахункова схема клеєфанерних плит - однопрогонова шарнірно оперта балка. Розрахункові поперечні перерізи коробчастої панелі - ребристих панелей обшивкою вниз, умовно таврове полицею вниз.

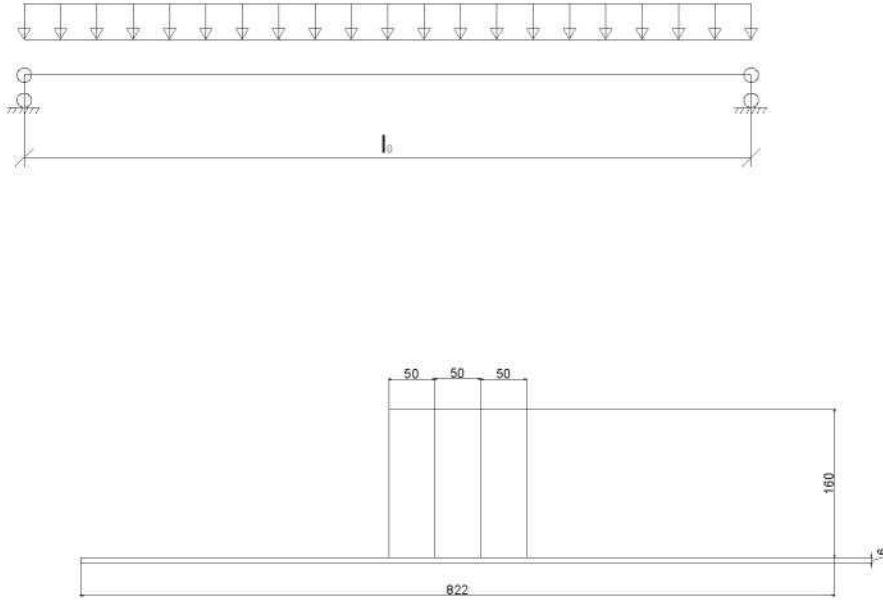


Рисунок 3.2 - Розрахункова схема

Розрахунковий проліт плити з урахуванням довжини опорної ділянки складе $l_0 = 2.692 - 0.04 = 2,652$ м

- Максимальний згинальний момент:

$$M_{max} = \frac{ql^2}{8} = \frac{7,82 * 2,652^2}{8} = 6,32 \text{ кНм};$$

- Максимальна поперечна сила:

$$Q_{max} = \frac{ql}{8} = \frac{7,82 * 2,652}{8} = 9,54 \text{ кНм};$$

Розрахункова ширина фанерної обшивки :

$$b_{розрах.} = 0,9b = 0,9 * 0,92 = 0,828 \text{ м} = 82,8 \text{ см}$$

Геометричні характеристики плити приводимо до деревини ребер, враховуючи відношення $E_{ф}/E_{др} = 9000/10000 = 0,9$

Приведена площа поперечного перерізу :

$$A_{\text{пр}} = n_p b_p h_p + b_{\text{розрах}} * \delta_{\phi} \frac{E_{\phi}}{E} = 3 * 5 * 16 + 82,8 * 0,6 * 0,9 = 284,71 \text{ см}^2$$

Приведений статичний момент відносно верхньої грані подовжніх ребер :

$$S_{\text{пр}} = \frac{n_p b_p h_p^2}{2} + b_{\text{розрах}} \delta_{\phi} \frac{E_{\phi}}{E} = 3 * 5 * 16 + 82,8 * 0,6 * 0,9 = 284,71 \text{ см}^2$$

Відстань від верхньої грані подовжніх ребер до центру тяжіння перерізу :

$$y_0 = \frac{S_{\text{пр}}}{A_{\text{пр}}} = \frac{2529,98}{284,92} = 8,87 \text{ см}$$

Відстань від центру тяжіння плити до зовнішньої грані фанерної обшивки :

$$h - y_0 = 16,6 - 8,87 = 7,73 \text{ см}$$

Відстань від центру тяжіння плити до центру тяжіння подовжніх ребер :

$$y_p = y_0 - \frac{h_p}{2} = 8,87 - \frac{16}{2} = 0,87 \text{ см}$$

Момент інерції фанерної обшивки щодо центру ваги плити (без урахування моменту фанерної обшивки щодо власної осі):

$$\begin{aligned} J_{\phi} &= b_{\text{розрах}} * \delta_{\phi} * \left(h - y_0 - \frac{\delta_{\phi}}{2} \right)^2 = 82,8 * 0,6 \left(16,6 - 8,87 - \frac{0,6}{2} \right)^2 \\ &= 2143,55 \text{ см}^4 \end{aligned}$$

Момент інерції ребер щодо нейтральної осі плити:

$$J_{\text{д}} = \frac{n_p b_p h_p^3}{2} + n_p b_p h_p y_p^2 = \frac{3 * 5 * 16^3}{12} + 3 * 5 * 16 * 0,87^2 = 5421,06 \text{ см}^4$$

Момент інерції поперечного перерізу плити, наведений до деревини:

$$J_{\text{пр}}^{\text{д}} = J_{\text{д}} + J_{\phi} \frac{E_{\phi}}{E_{\text{д}}} = 5421,06 + 2143,55 * 0,9 = 7350,26 \text{ см}^4$$

Момент інерції поперечного перерізу плити, наведений до фанери:

$$J_{\text{пр}}^{\phi} = J_{\phi} + J_{\text{д}} \frac{E_{\text{д}}}{E_{\phi}} = 2143,55 + 5421,06 * 1,11 = 8160,92 \text{ см}^4$$

Розрахунок плити по I групі граничних станів.

1) Перевірка нижньої обшивки на міцність при вигині:

$$\sigma_{\text{р}} = \frac{M(h - y_0)}{J_{\text{пр}}^{\phi}} = \frac{632 * 7,73}{8160,92} = 0,599 \text{ МПа} < \frac{R_{\phi, \text{р}} k_f}{y_n} = \frac{14 * 0,6}{1} = 8,4 \text{ МПа}$$

Умова виконується.

2) Напряга в стислих волокнах подовжніх ребер, працюючих на вигин :

$$\sigma_{\text{р}} = \frac{M y_0}{J_{\text{пр}}^{\text{д}}} = \frac{632 * 7,73}{8160,92} = 0,6 \text{ МПа} < \frac{R_i}{y_n} = \frac{13}{1} = 13 \text{ МПа}$$

Умова виконується.

3) Перевірка на сколювання фанерної обшивки по шву в місці примикання її до ребра:

$$\tau = \frac{Q S_{\text{пр}}^{\phi}}{J_{\text{пр}}^{\phi} \sum b_p} = \frac{9,54 * 369,12}{8160,92 * 15} = 0,028 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = 0,024 \text{ МПа} < \frac{R_{\phi, \text{ск}}}{y_n} = \frac{0,8}{1} = 0,8 \text{ МПа}$$

Умова виконується.

Де приведений статичний момент фанерної обшивки (нижньою) відносно центру тяжіння (центральної осі) перерізу рівний:

$$S_{\text{пр}}^{\phi} = b_{\text{розрах}} * \delta_{\phi} \left(h - y_0 - \frac{\delta_{\phi}}{2} \right) = 82,8 * 0,6 \left(16,6 - 8,87 - \frac{0,6}{2} \right) = 369,12 \text{ см}^3$$

Розрахунок плити по II групі граничних станів.

1) Перевірка плити на прогин:

Відносний прогин плити при $q_n = 5,66 \text{ кН/м} = 0,0566 \text{ кН/см}$ і

$$E_{\text{д}} = 10000 \text{ МПа} = 1000 \text{ кН/см}^2$$

$$\frac{f}{l} = \frac{5 * q_H * l_0^3}{384 * 0,7 * E_d * J_d^{пр}} = \frac{5 * 0,0566 * 269,2^3}{384 * 0,7 * 1000 * 8160,92} = 0,002516 < \frac{1}{250} = 0,004$$

Умова виконується.

3.2.2.

3.2.2. Статичний розрахунок куполу з деревини

Виходячи з даних:

Об'єм ребер каркаса = 101м³ (перетин ребра прийmemo 455x160);

Матеріал ребер – дощато-клеєна дошка із сосни 2-го сорту (ρ = 500 кг/м³);

Умовно візьmemo вагу конекторів рівним 20% від ваги ребер;

Площа, що перекривається куполом = πR² = 12,5² π = 490,62 м²;

Таблиця 3.3- Збір навантажень на 1 погонний метр

Вид навантаження	Нормативне навантаження, кН/м ²	Коефіцієнт надійності по навантаженню	Розрахункова навантаження, кН/м ²
Постійне навантаження:			
Навантаження від власної ваги куполу	0,62	1,1	0,68
Навантаження від ваги покрівлі	0,88	1,2	1,06
Разом:	1,5		1,74
Тимчасове навантаження:			
Снігова (IV район)	2	1,4	2,8
Вітрова (II район)	0,303	1,4	0,42

Статичний розрахунок проводимо у програмі Ліра-Сапр версія 2015. Для визначення максимальних зусиль у купольній конструкції, у цій роботі, були прийняті навантаження та поєднання навантажень:

1. Власна вага + снігове навантаження (рівномірно розподілене).
2. Одностороннє навантаження снігового навантаження (для другого випадку снігового навантаження на купольну конструкцію як найбільш завантажене, отримане розрахунком наведеного в р.3.1.2).
3. Власна вага + вітрове навантаження.
4. Власна вага + одностороннє навантаження снігового навантаження.
5. Поєднання навантажень від власної ваги + одностороння.

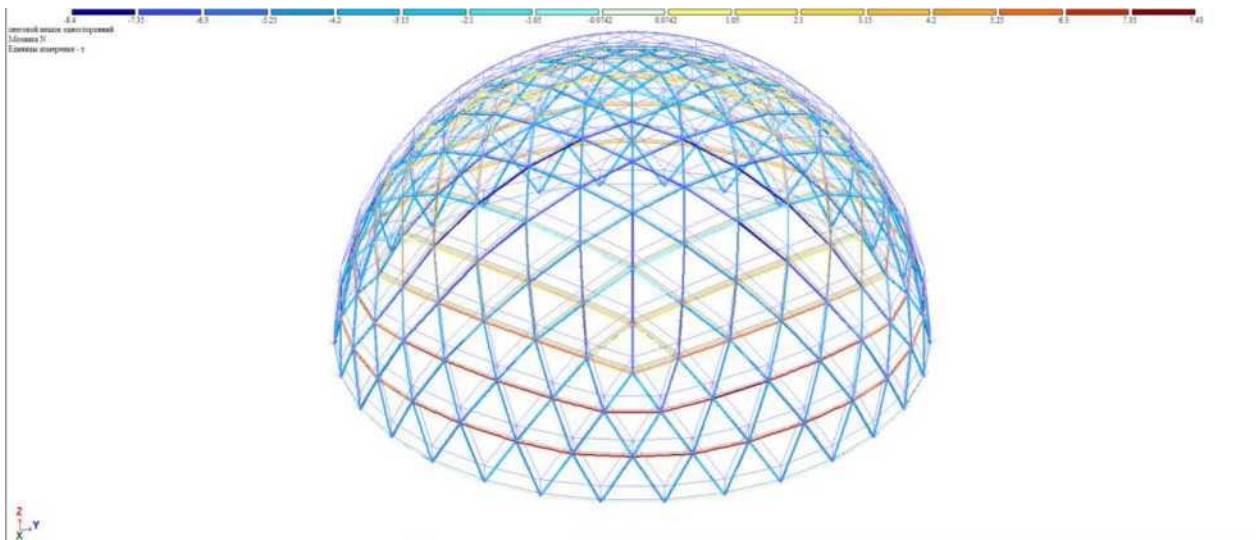


Рисунок 3.3 - Максимальні зусилля, що виникають у куполі сітчастому з деревини

Як видно з рисунку 3.3, максимальні зусилля виникають від одностороннього навантаження снігового навантаження. Інші види навантаження розвантажують зусилля, що виникають у стрижнях купола.

За результатами розрахунку були встановлені максимальні зусилля у стрижнях на стиск $N_c=8,4$ тонн (84кН), на розтяг $N_p=7,43$ тонни (74,3кН).

Максимальні переміщення у вузлах бані при поєднанні зусиль по осі Z склало 3,15 мм. (Рис.3.4)

Максимальний момент у стрижнях купола становив від $M = -0.262 \text{ т} * \text{ м}$ ($-2,62 \text{ кН} * \text{ м}$) до $M = 0.263 \text{ т} * \text{ м}$ ($2,63 \text{ кН} * \text{ м}$). (рис.3.5)

Розрахункові моменти для поперечних сил у стрижнях купола становить від $Q = -0.194 \text{ т}$ ($-1,94 \text{ кН}$) до $Q = 0.188 \text{ т}$ (1.88 кН). (Рис.3.6)

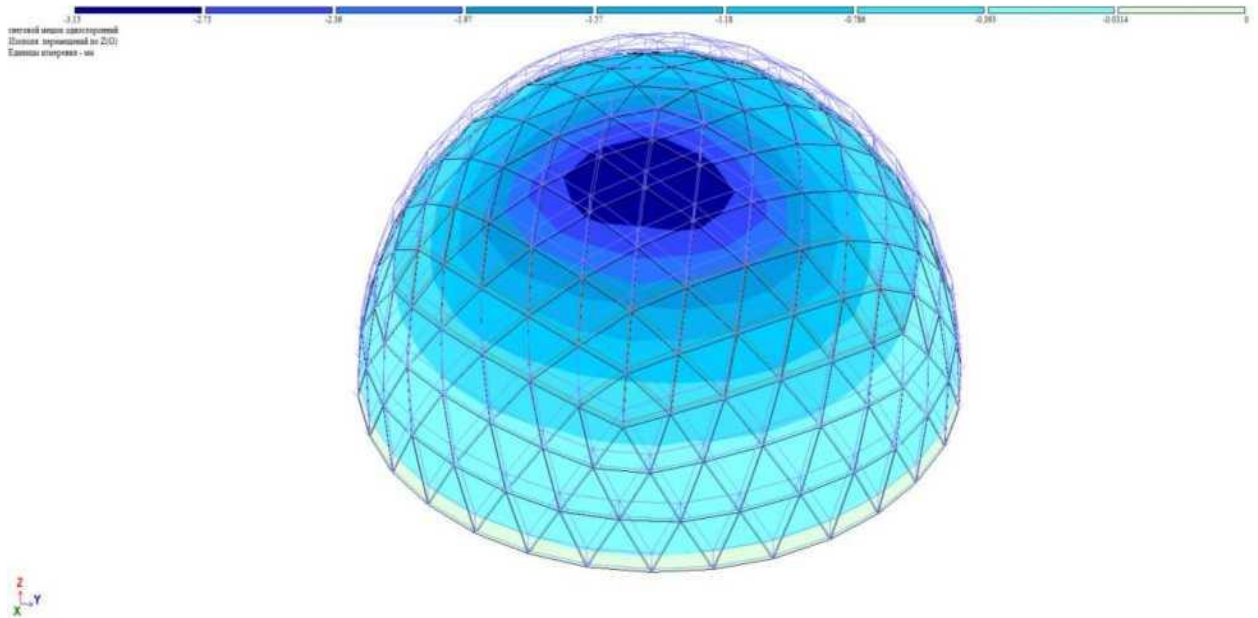


Рисунок 3.4 - Максимальні переміщення осі Z що виникають у куполі сітчастому з деревини

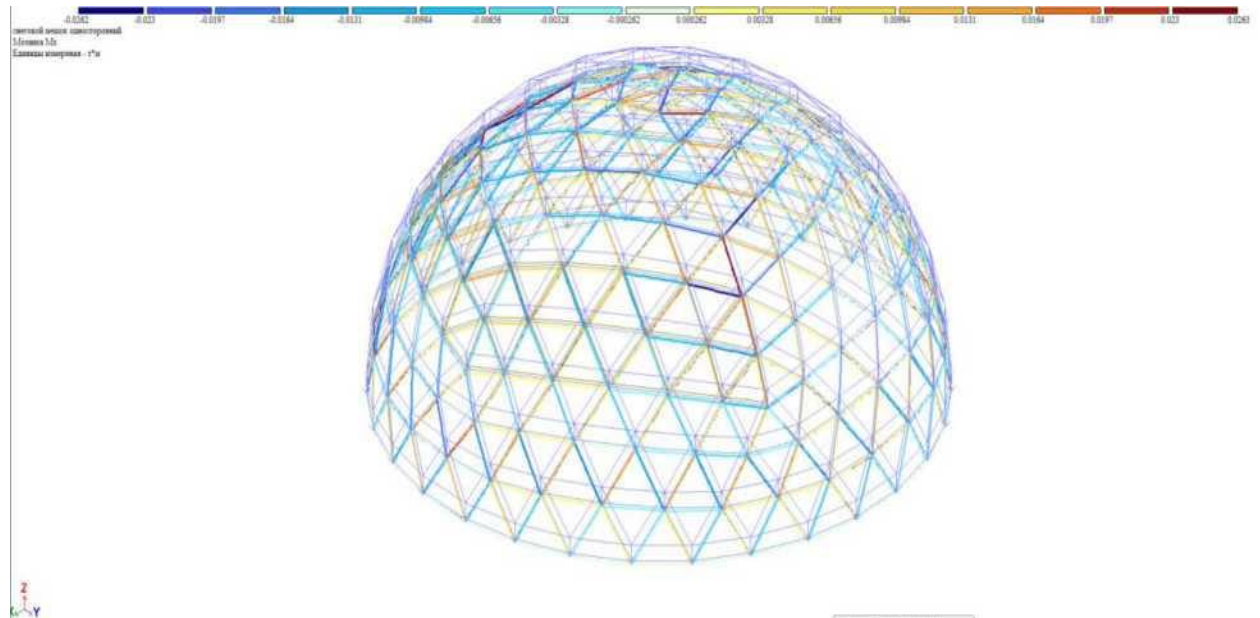


Рисунок 3.5 - Максимальний момент, що виникає в куполі сітчастому з деревини.

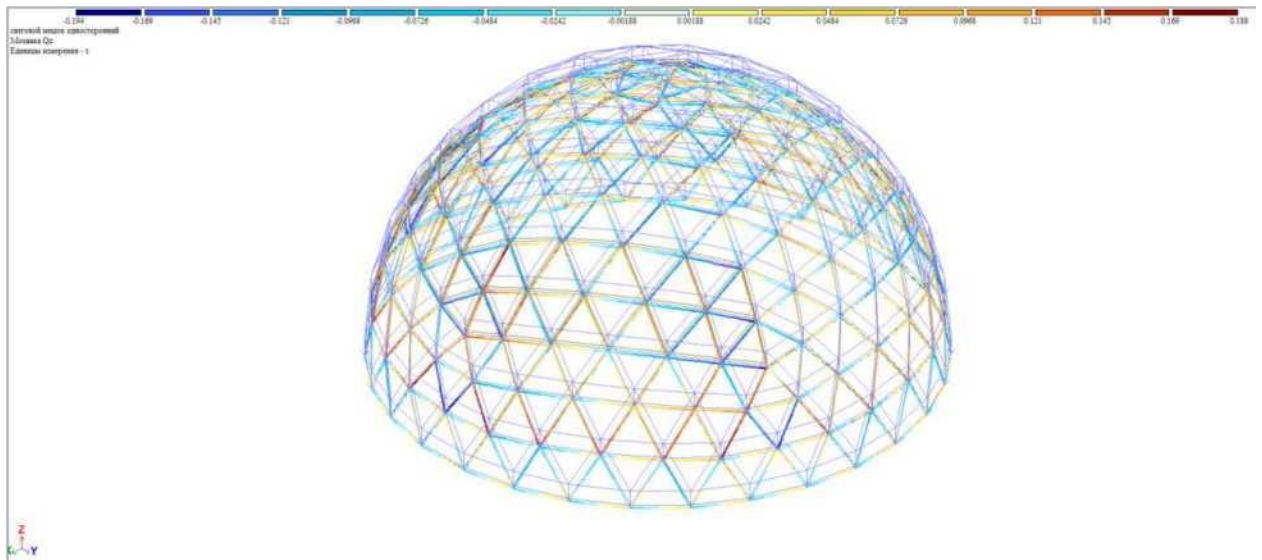


Рисунок 3.6 - Розрахункові моменти для поперечних сил виникають у куполі сітчастому з деревини.

3.2.3. Конструктивний розрахунок купола

За величиною максимально стискаючої сили ($N_c = -84 \text{ кН}$) робимо підбір стрижнів решітки купола. Розрахункова довжина стрижня складає 2,573 м-кodu.

Елемент каркаса розраховуємо як стисло-вигнутий шарнірно-опертий по кінцях стрижень з урахуванням можливого випадкового ексцентриситету. Для цього попередньо приймаємо переріз розміром 455x160 мм.

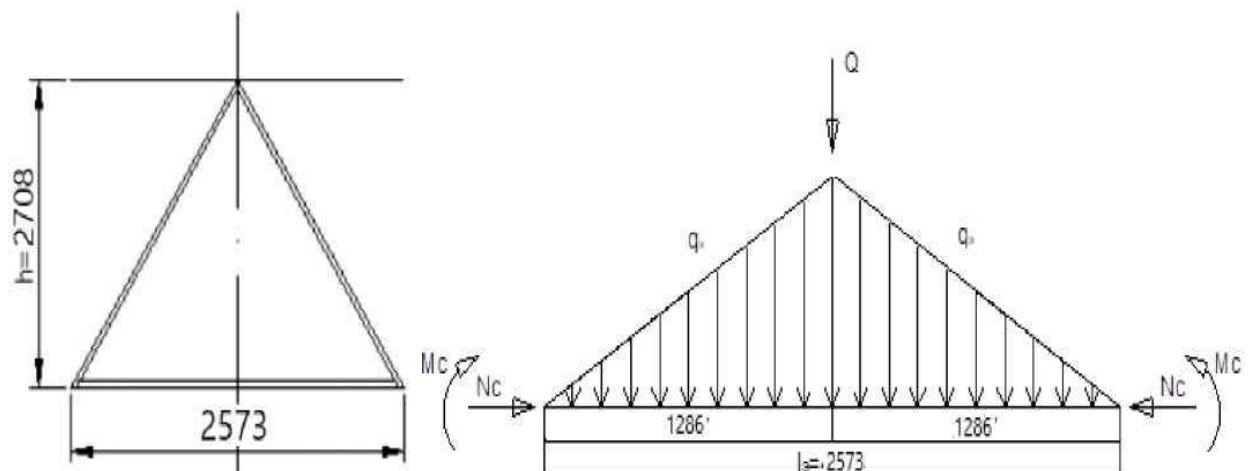


Рисунок 3.7 - Розрахункова схема елемента купола

Визначаємо геометричні характеристики поперечного перерізу :

- площа перерізу $A=45,5*6=728\text{см}^2$;

- моменти інерції : $J_{max} = \frac{bh^3}{12} = \frac{16*45,5^3}{12} = 125595 \text{ см}^4$;

$$J_{min} = \frac{hb^3}{12} = \frac{45,5 * 16^3}{12} = 15530 \text{ см}^4;$$

- моменти опору : $W_{max} = \frac{bh^2}{12} = \frac{16*45,5^2}{12} = 5520 \text{ см}^3$;

$$W_{max} = \frac{hb^2}{12} = \frac{45,5 * 16^2}{12} = 1941,33 \text{ см}^3;$$

- гнучкість: $\lambda_x = \frac{l_0}{\sqrt{\frac{I_x}{A}}} = \frac{257,3}{\sqrt{\frac{125595}{728}}} = 19,57 < [\lambda] = 150$;

- $\lambda_y = \frac{l_0}{\sqrt{\frac{I_y}{A}}} = \frac{257,3}{\sqrt{\frac{15530}{728}}} = 55,70 < [\lambda] = 150$;

$$\text{Тоді: } \xi = 1 - \frac{\lambda^2 N}{3000 R_c A_e} = 1 - \frac{22,81^2 * 43,41 * 10^{-3}}{300 * 15 * 728 * 10^{-4}} = 1 - 0,008 = 0,992$$

Виконуємо перевірку елемента по міцності:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{MR_c}{\xi WR_u} = \frac{84 * 10^{-3}}{728 * 10^{-4}} + \frac{3,5 * 10^{-3} * 15}{0,992 * 5520 * 10^{-6} * 15} = 1,62 \text{ МПа} < R_c = 15 \text{ МПа}$$

Перевіряємо жорсткість елемента :

$$\frac{f}{l} = \frac{7}{1024} * \frac{q_n^e l^3}{EJ} + \frac{Q_n l^2}{48EJ} = \frac{7}{1024} * \frac{(2,63 + 1,88) * 10^{-3} * 2,573^3}{10^4 * 125595 * 10^{-8}} + \frac{84 * 10^{-3} * 2,573^2}{48 * 10^4 * 125595 * 10^{-8}} = 0,00096 < \left[\frac{f}{l} \right] = \frac{1}{300} = 0,0033$$

Умова виконується з великим запасом

Приймаємо переріз 400*160мм

Виконуємо перевірку елемента за міцністю на стиск:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M}{\xi W} = \frac{84 * 10^{-3}}{640 * 10^{-4}} + \frac{3,5 * 10^{-3}}{0,992 * 4266 * 10^{-6}} = 6,51 \text{ МПа} < R_c = 13 \text{ МПа}$$

Виконуємо перевірку елемента за міцністю на розтягування:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{MR_p}{\xi WR_u} = \frac{73,3 * 10^{-3}}{640 * 10^{-4}} + \frac{3,5 * 10^{-3}}{4266 * 10^{-6} * 15} = 1,98 \text{ МПа} < R_c = 10 \text{ МПа}$$

Виконуємо перевірку елемента на зминання:

$$\frac{N}{F} = \frac{84 * 10^{-3}}{640 * 10^{-4}} = 1,31 \text{ МПа} < R_{cm} = 11,8 \text{ МПа}$$

Перевіряємо жорсткість елемента:

$$\frac{f}{l} = \frac{7}{1024} * \frac{q_n^e l^3}{EJ} + \frac{Q_n l^2}{48EJ} = \frac{7}{1024} * \frac{(2,63 + 1,88) * 10^{-3} * 2,573^3}{10^4 * 125595 * 10^{-8}} + \frac{84 * 10^{-3} * 2,573^2}{48 * 10^4 * 13623 * 10^{-8}} = 0,00329 < \left[\frac{f}{l} \right] = \frac{1}{300} = 0,0033$$

Умова виконується

Остаточно приймаємо переріз 400*160мм.

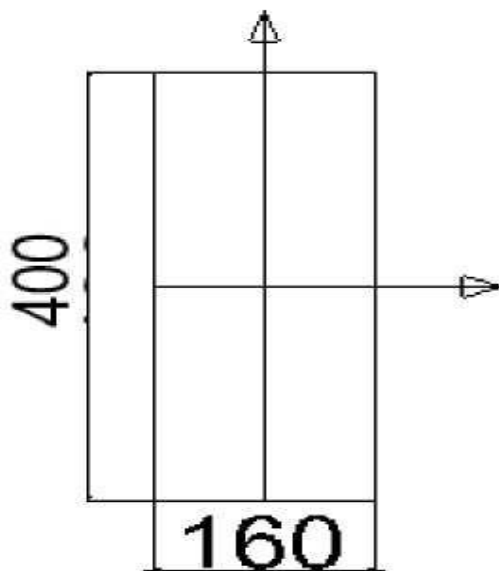


Рисунок 3.8 - Поперечний переріз елемента

3.2.4. Розрахунок куполу на стійкість

Вводимо такі припущення:

- згинальна жорсткість обшивки та податливість вузлів не враховується;

- шарнірне з'єднання у вузлах;

- навантаження прикладене у вузлах.

Перевіряємо місцеву стійкість. Визначаємо гнучкість п'ятигранної піраміди:

$$\lambda = \frac{2,53}{0,133} \sqrt{\frac{1 + 8\sin 36^\circ \sin y_{12}}{\sin 36^\circ \sin y_{12}}} = \frac{2,53}{0,133} \sqrt{\frac{1 + 8\sin 36^\circ \sin 87,1^\circ}{\sin 36^\circ \sin 87,1^\circ}} = 59,26$$

Де y_{12} - кут між вертикальною віссю піраміди і віссю одного з ребер п'ятигранника ($y_{12} \approx 87,1^\circ$).

$$\lambda = \frac{2,53}{0,133} \sqrt{\frac{1 + 8\sin 36^\circ \sin y_{12}}{\sin 36^\circ \sin y_{12}}} = \frac{2,53}{0,133} \sqrt{\frac{1 + 8\sin 36^\circ \sin 87,1^\circ}{\sin 36^\circ \sin 87,1^\circ}} = 59,26$$

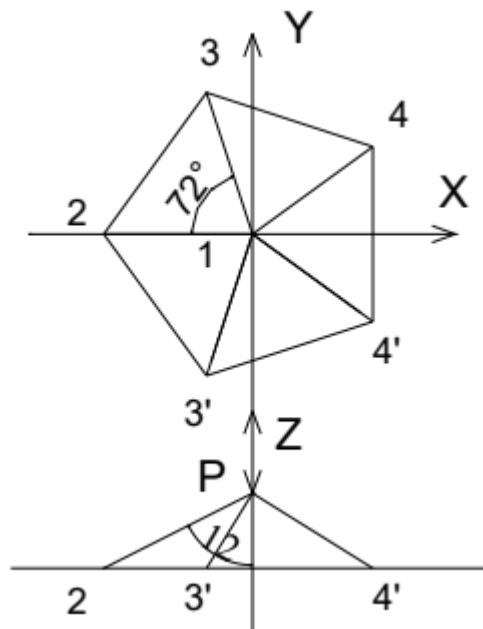


Рисунок 3.9 - Схема п'ятигранної піраміди

Для стрижня каркаса бані $X = 79$, що більше 59,26. Таким чином, гнучкість стрижня перевищує граничну гнучкість системи та розрахунковою буде перевірка стрижня на стійкість за загальними правилами. X.

Перевірка загальної стійкості.

Втрату загальної стійкості із достатньою точністю можна дослідити, розглядаючи стійкість еквівалентної континуальної оболонки. Стійкість континуальної оболонки перевіряємо за формулою

$$q_{кр} = k \frac{EF_r}{lR^2} = 1,6 \frac{10^4 * 0,40 * 0,16 * 0,402}{2,573 * 12,5^2} = 10,24 \text{ кН/м}^2$$

$$\text{Де } r = \frac{L_p}{r_x} = \frac{257,3}{1,6 * 40} = 40,2 \text{ см}$$

Таким чином, $q = 4,5 \text{ кН/м}^2 < q_{кр} = 10,24 \text{ кН/м}^2$. Умова стійкості виконано.

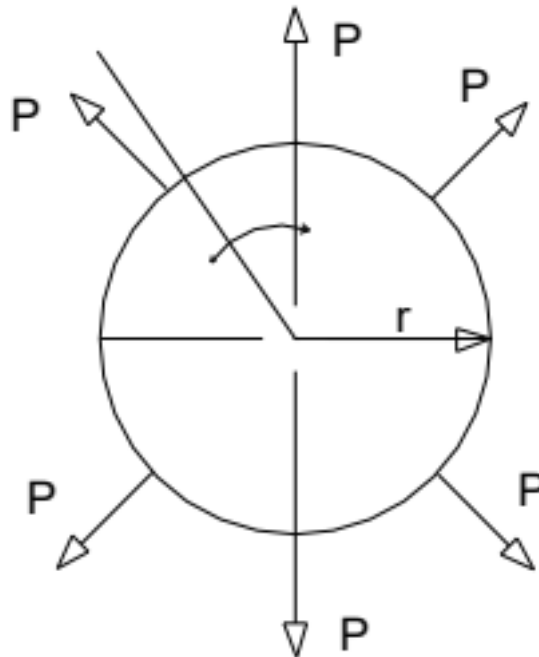


Рисунок 3.10- Схема завантаження вузла

Розрахунок вузлів бані.

Розрахунок вузла на розтягування зосередженими силами $\alpha = 30^\circ$; $P = 84 \text{ кН}$; $\varphi = 30^\circ$. Визначаємо нормальну силу у трубі при $\varphi = 0$:

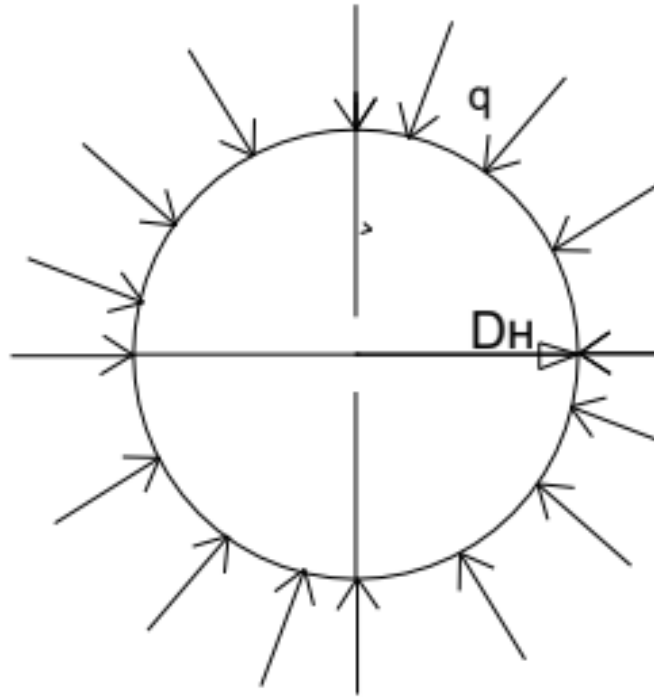


Рисунок 3.11 - Розрахункова схема вузла

$$N = \frac{P}{2\sin\alpha} \cos\alpha = \frac{84}{2 * 0,5} * 0,866 = 72,74 \text{ кН}$$

Згинальний момент дорівнює:

$$M_{max} = \frac{1}{2} Pr \left(\frac{1}{\varphi} - ctg\varphi \right) = -\frac{1}{2} * 84 * 0,248(0,524 - 1,732) = 12,6 \text{ кН * м}$$

Визначимо напругу з урахуванням пластичної роботи матеріалу для сталі С235.

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{F} = \frac{12,6 * 10^{-3}}{0,325 * 0,014^2} + \frac{72,74 * 10^{-3}}{0,325 * 0,014^2} = 20,92 \text{ МПа} < R_c = 23 \text{ МПа}$$

При цьому передбачається, що ослаблення вертикальними прорізами компенсується жорсткою діафрагмою.

Розрахунок вузла на обтиснення торцями клеєних елементів.
Визначаємо зовнішній периметр вузлового елемента

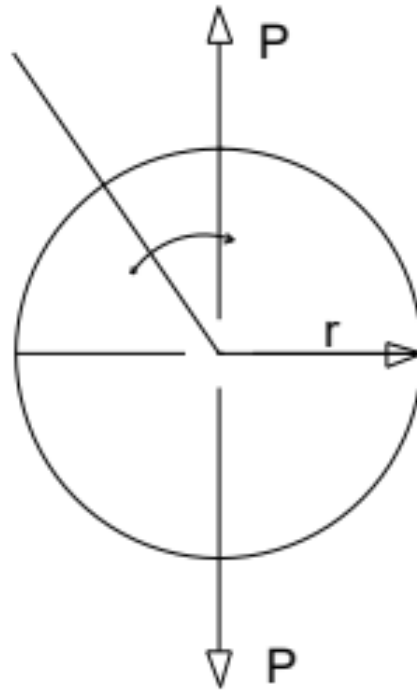


Рисунок 3.12 - Розрахункова схема вузла

$$L = \pi D_H = 3,14 * 0,325 = 1,02 \text{ м}$$

де D_H – зовнішній діаметр вузлового з'єднання.

Тоді навантаження дорівнюватиме :

$$q = \frac{6P}{l} = \frac{6 * 84}{1,02} = 494,1 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

$$N = qR = 494,1 * 0,1625 = 80,29 \text{ кН}$$

Перевіряємо міцність вузлового з'єднання.

$$\sigma = \frac{N}{F_{\text{пл}}} = \frac{80,29 * 10^{-3}}{0,325 * 0,022} = 22,45 \text{ МПа} < R_c = 23 \text{ МПа}$$

де $F_{\text{пл}}$ – площа труби з урахуванням послаблень.

Розрахунок вузла на дію однієї зосередженої сили. Визначити нормальну силу у трубі

$$N = -\frac{1}{2} P \sin \alpha = -\frac{12}{2} 84 * 1 = 42 \text{ кН}$$

Згинальний момент дорівнює:

$$M_{max} = 0,3183Pr_{cp} = 0,3183 * 42 * 0,1625 = 2.17 \text{ кН} * \text{м}$$

Перевірка вузла на міцність

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W_{пл}} + \frac{N}{F_{пл}} = \frac{2,17 * 10^{-3}}{0,325 * 0,022^2} + \frac{42 * 10^{-3}}{0,325 * 0,022} = 20,926 \text{ МПа} < R_c$$

$$= 24 \text{ МПа}$$

Приймаємо трубу D-325x22 для шестипроменевого конектора.

Розрахунок опорного вузла. Визначаємо зусилля, що відриває, в опорному вузлі силами $R = 2P \cos 30^\circ = 2 * 74,3 * 0,866 = 128,68 \text{ кН}$

Де $P = 74,3 \text{ кН}$;

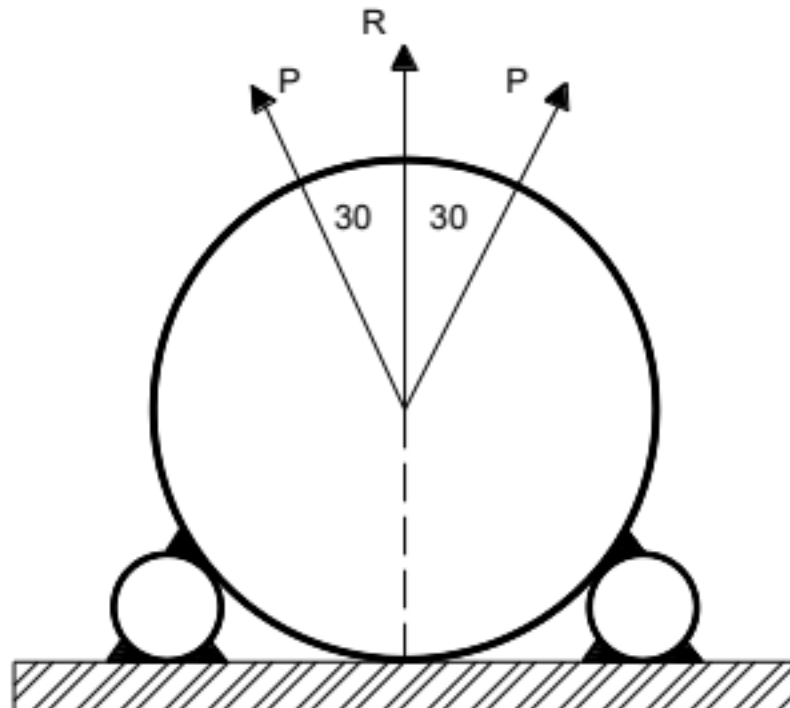


Рисунок 3.13- Розрахункова схема опорного вузла

Вважаючи, що зусилля, що відривають, можуть сприйматися тільки одним з кутових швів і нехтуючи місцевим згинальним моментом, визначимо напругу в зварному шві

$$\tau_f = \frac{R}{\beta h_f l_f} = \frac{128,68 * 10^{-3}}{0,7 * 0,008 * 0,16} = 95,75 \text{ МПа} < 130 \text{ МПа}$$

де l_f - Довжина кутового шва (160 мм); hf - катет шва, приймаємо рівним 12 мм.

Розрахунок клеєстерового з'єднання.

З'єднання виконується у вигляді штиря, вклеєного в заздалегідь просвердлений отвір у торці стрижня на епоксидно-цементній композиції. Глибина вклеювання трохи більше 30 діаметрів арматури. Діаметр отвору на 5 мм більший за діаметр арматури. Перевіряємо несучу здатність з'єднання на висмикування:

$$T = R_{ck}\pi(+0,005)lk_c$$

де l - Довжина частини арматури, що вклеюється (приймаємо два стрижні рівної 500 мм); d - діаметр арматури, що вклеюється (25 мм); $R_{ck} = 1,2$ МПа;

K_c - коефіцієнт, що враховує геометричні розміри арматури, що вклеюється.

$$K_c = 1,2 - 0,02 \frac{l}{d} = 1,2 - 0,02 \frac{500}{25} = 0,8$$

$$T = (1,2 * 10^{-3} * 3.14(0,025 + 0,005)0,5 * 0.8)^2 = 0,000090,432 \text{ МПа} = 906432 > 7463\text{кН}$$

Запроектована конструкція клеєстерового з'єднання задовольняє вимогам розрахунку.

Расчет узла шестилучевого коннектора.

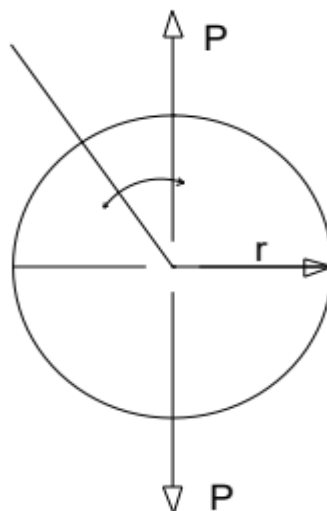


Рисунок 3.14 - Розрахункова схема вузла

$$L = \pi D_H = 3,14 * 0,377 = 1,18\text{м}$$

де D_H – зовнішній діаметр вузлого з'єднання.

Тоді навантаження дорівнюватиме :

$$q = \frac{6P}{l} = \frac{6 * 84}{1,18} = 427,11 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

$$N = qR = 427,11 * 0,1885 = 80,5 \text{ кН}$$

Перевіряємо міцність вузлого з'єднання.

$$\sigma = \frac{N}{F_{\text{пл}}} = \frac{41,6 * 10^{-3}}{0,377 * 0,01} = 21,352 \text{ МПа} < R_c = 23\text{МПа}$$

де $F_{\text{пл}}$ – площа труби з урахуванням послаблень.

Розрахунок вузла на дію однієї зосередженої сили. Визначити нормальну силу у трубі

$$N = -\frac{1}{2}P \sin \alpha = -\frac{12}{2}84 * 1 = 42 \text{ кН}$$

Згинальний момент дорівнює:

$$M_{\text{max}} = 0,3183Pr_{cp} = 0,3183 * 84 * 0,1885 = 5,04 \text{ кН * м}$$

Перевірка вузла на міцність

$$\sigma = \frac{M_{\text{max}}}{W_{\text{пл}}} + \frac{N}{F_{\text{пл}}} = \frac{5,04 * 10^{-3}}{0,377 * 0,26^2} + \frac{42 * 10^{-3}}{0,377 * 0,26} = 21,03 \text{ МПа} < R_c = 23\text{МПа}$$

Приймаємо трубу D-377x26 для шестипроменевого конектора.

3.3. Розрахунок купола сітчастого з металу

3.3.1. Статичний розрахунок купола з металу

Навантаження на купол із деревини приймаємо виходячи з даних:

Ребра каркаса = 1387 мп (перетин ребра приймемо з труби сталевій безшовної 159*10);

Матеріал ребер - дощато-клеєна дошка із сосни 2-го гатунку ($\rho = 500$ кг/м³);

Умовно візьмемо вагу конекторів рівним 20% від ваги ребер;

Площа, що перекривається куполом = $\pi R^2 = \pi R^2 = 12,5^2 \pi = 490,62$ м²;

Таблиця 3.4- Збір навантажень на 1 погонний метр

Вид навантаження	Нормативне навантаження, кН/м ²	Коефіцієнт надійності по навантаженню	Розрахункова навантаження, кН/м ²
Постійне навантаження:			
Навантаження від власної ваги куполу	6,1	1,1	6,72
Навантаження від ваги покрівлі	0,89	1,2	1,07
Разом:	6,99		7,79
Тимчасове навантаження:			
Снігова (IV район)	2	1,4	2,9
Вітрова (II район)	0,302	1,4	0,41

Статичний розрахунок проводимо у програмі Ліра-Сапр 2015 R15. Для визначення максимальних зусиль у купольній конструкції, у цій роботі, були прийняті навантаження та поєднання навантажень:

1. Власна вага + снігове навантаження (рівномірно розподілена)

2. Одностороннє навантаження снігового навантаження (для другого випадку снігового навантаження на купольну конструкцію як найбільш завантажене, отримане розрахунком наведеного в р.3.1.2)

3. Власна вага + вітрове навантаження

4. Власна вага + одностороннє навантаження снігової навантаження

5. Поєднання навантажень від власної ваги + одностороння снігове навантаження + вітрове навантаження

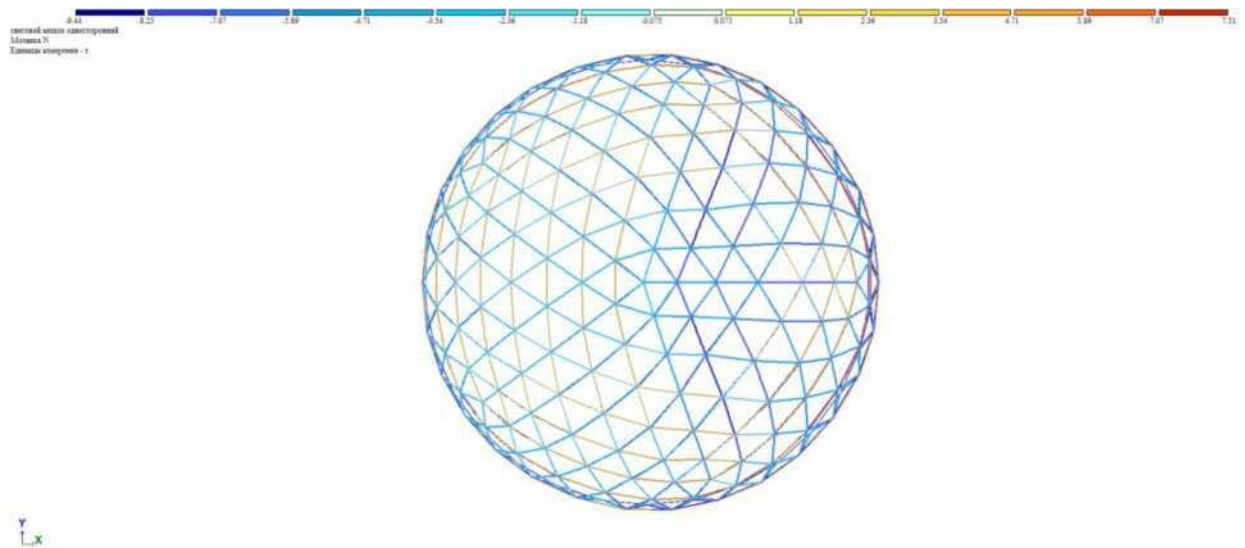


Рисунок 3.15 - Максимальні зусилля, що виникають у куполі сітчастому з металу.

Як видно з рисунка 3.15, максимальні зусилля виникають від одностороннього навантаження снігового навантаження. Інші види навантаження розвантажують зусилля, що виникають у стрижнях купола.

За результатами розрахунку були встановлені максимальні зусилля у стрижнях на стиснення $N_c=9,44$ тонн (94,4кН), на розтяг $N_p=7,51$ тонни (75,1кН).

Максимальні переміщення у вузлах бані при поєднанні зусиль по осі Z склало 2,82 мм. (Рис.3.16)

Максимальний момент у стрижнях бані становив від $M = -0.171$ т * м (-1,71 кН * м) $M = 0.117$ т * м (1,71 кН * м). (Рис. 3.17)

Розрахункові моменти для поперечних сил у стрижнях купола становить від $Q = -0.116\text{т}$ ($-1,16\text{кН}$) до $Q = 0.116\text{т}$ ($1,16\text{кН}$). (Рис. 3.18)

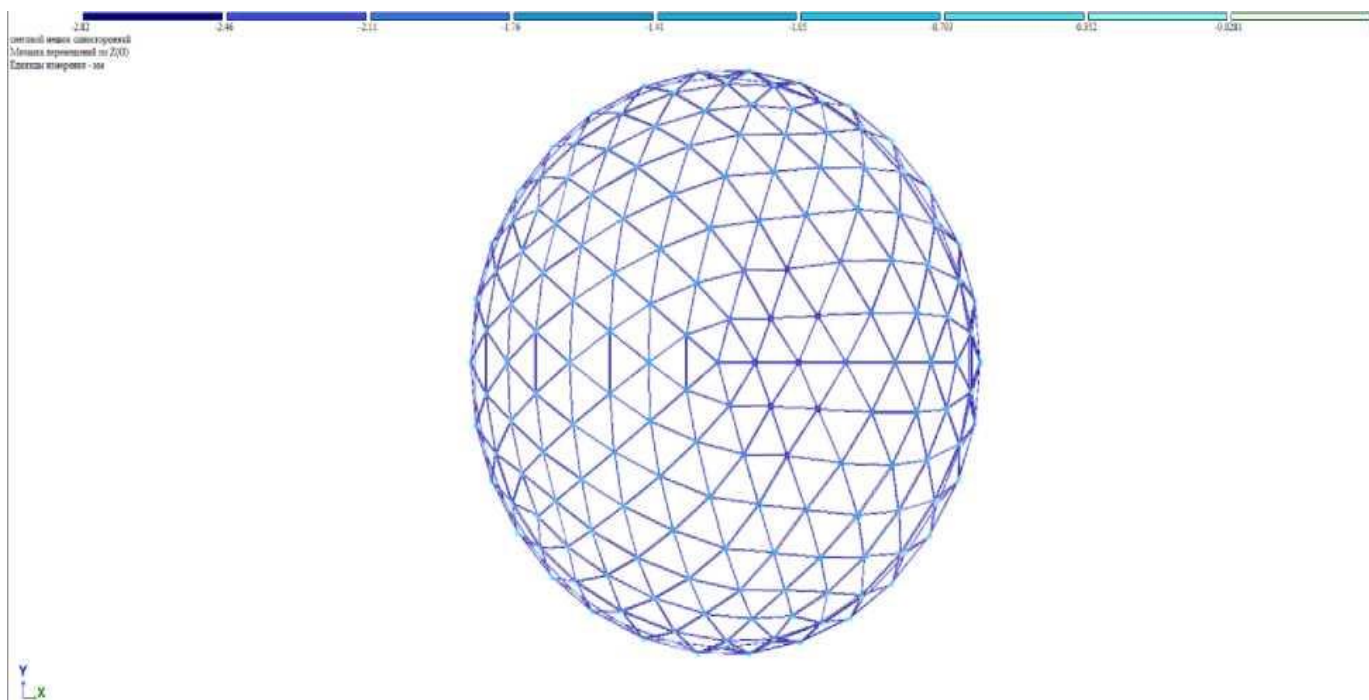


Рисунок 3.16 - Максимальні переміщення осі Z що виникають у куполі сітчастому з металу.

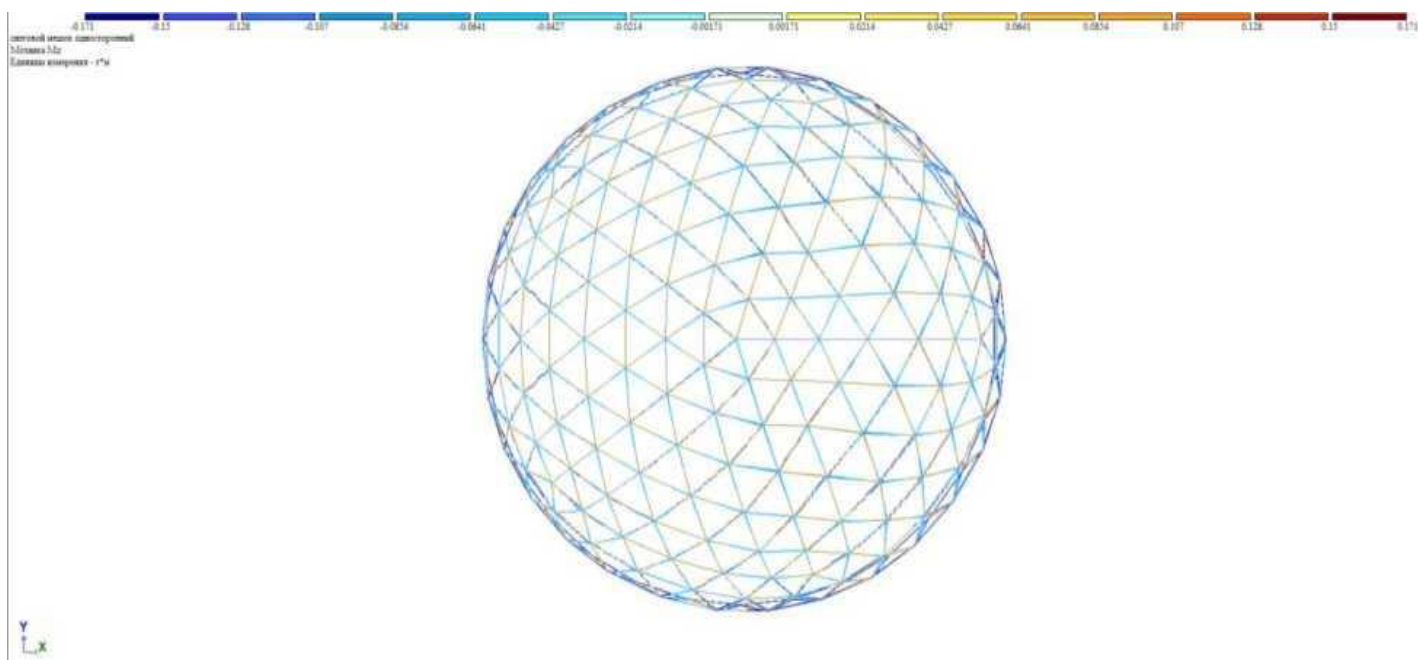


Рисунок 3.17 - Максимальний момент, що виникає в куполі сітчастим із металу

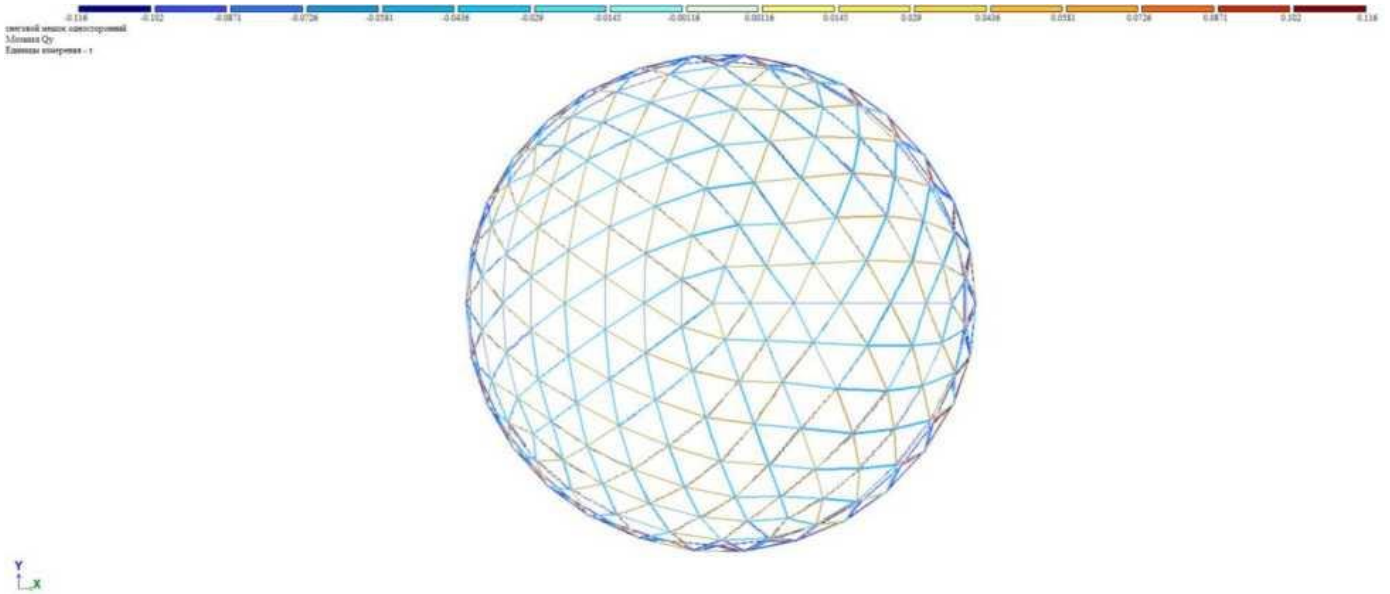


Рисунок 3.18 - Розрахункові моменти для поперечних сил виникають у куполі сітчастому з металу

3.3.2. Конструктивний розрахунок купола

За величиною максимально стискаючої сили ($N_c = -94,4$ кН) робимо підбір стрижнів решітки купола. Розрахункова довжина стрижня складає 2,573 м.

Елемент каркаса розраховуємо як стисло-вигнутий шарнірно-опертий по кінцях стрижень з урахуванням можливого випадкового ексцентриситету.

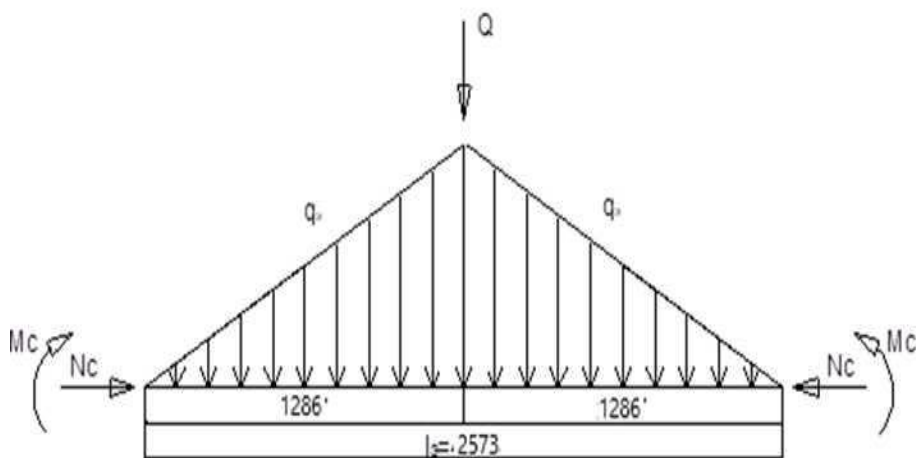


Рисунок 3.19 - Розрахункова схема елемента купола

Визначаємо геометричні характеристики поперечного перерізу :

- площа перерізу $A=46.81\text{см}^2$;
- моменти інерції : $J_{max} = \frac{\pi D^3 \delta}{8} \approx 0,39126D^4 \delta = 1577,72 \text{ см}^4$;
- моменти опору : $W_x = \frac{\pi D^2 \delta}{4} \approx 0,7856D^2 \delta = 198,45 \text{ см}^4$;
- гнучкість: $\lambda = \frac{l_0}{\sqrt{\frac{I_x}{A}}} = \frac{257,3}{\sqrt{\frac{1577,72}{46,81}}} = 44,31 < [\lambda] = 150$;

$$\text{Тоді: } \xi = 1 - \frac{\lambda^2 N}{3000 R_c A_e} = 1 - \frac{22,81^2 * 94,4 * 10^{-3}}{300 * 24 * 46,81 * 10^{-4}} = 1 - 0,145 = 0,855$$

Виконуємо перевірку елемента по міцності:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi F} + \frac{94,4 * 10^{-3}}{0,85 * 46,81 * 10^{-4}} = 23,72 \text{ МПа} < R_c \gamma_c = 24 * 1 = 24 \text{ МПа}$$

Виконуємо перевірку елемента за міцністю на розтягування:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{94,4 * 10^{-3}}{46,81 * 10^{-4}} = 20,16 \text{ МПа} < R_c \gamma_c = 24 * 1 = 24 \text{ МПа}$$

Перевіряємо жорсткість елемента :

$$\frac{f}{l} = \frac{7}{1024} * \frac{q_n^e l^3}{EJ} + \frac{Q_n l^2}{48EJ} = \frac{7}{1024} * \frac{(1,17 + 1,16) * 10^{-3} * 2,573^3}{2,06 * 10^4 * 1577,72 * 10^{-8}} +$$

$$+ \frac{94 * 10^{-3} * 2,573^2}{48 * 2,06 * 10^6 * 1577,72 * 10^{-8}} = 0,0020539 < \left[\frac{f}{l} \right] = \frac{1}{300} = 0,0033$$

Умова виконується

Остаточно приймаємо трубу 159x10.

3.3.3. Розрахунок куполу на стійкість

Вводимо наступні допущення:

- вигиниста жорсткість обшивки і податливість вузлів не враховується;

- з'єднання шарнірне у вузлах;
- навантаження прикладене у вузлах.

Перевіряємо місцеву стійкість. Визначаємо гнучкість п'ятигранної піраміди :

Перевіряємо місцеву стійкість. Визначаємо гнучкість п'ятигранної піраміди:

$$\lambda = \frac{2,53}{0,133} \sqrt{\frac{1 + 8\sin 36^\circ \sin y_{12}}{\sin 36^\circ \sin y_{12}}} = \frac{2,53}{0,133} \sqrt{\frac{1 + 8\sin 36^\circ \sin 87,1^\circ}{\sin 36^\circ \sin 87,1^\circ}} = 59,26$$

Де y_{12} - кут між вертикальною віссю піраміди і віссю одного з ребер п'ятигранника ($y_{12} \approx 87,1^\circ$).

$$\lambda = \frac{2,53}{0,133} \sqrt{\frac{1 + 8\sin 36^\circ \sin y_{12}}{\sin 36^\circ \sin y_{12}}} = \frac{2,53}{0,133} \sqrt{\frac{1 + 8\sin 36^\circ \sin 87,1^\circ}{\sin 36^\circ \sin 87,1^\circ}} = 59,26$$

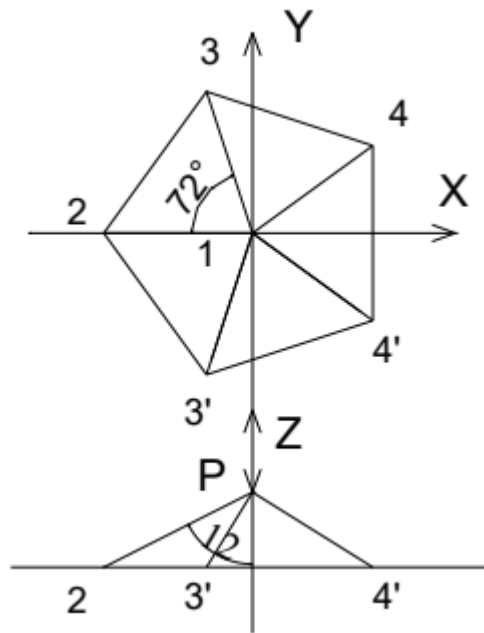


Рисунок 3.20 - Схема п'ятигранної піраміди

Для стрижня каркаса бані $\lambda = 79$, що більше $59,26$. Таким чином, гнучкість стрижня перевищує граничну гнучкість системи та розрахунковою буде перевірка стрижня на стійкість за загальними правилами. λ .

Перевірка загальної стійкості. Втрату загальної стійкості з достатньою точністю можна досліджувати, розглядаючи стійкість еквівалентної континуальної оболонки. Стійкість континуальної оболонки перевіряємо за формулою

$$q_{кр} = k \frac{EF_r}{lR^2} = 1,6 \frac{2,06 * 10^{46} * 46,81 * 0,55}{2,573 * 12,5^2} = 13,19 \text{ кН/м}^2$$

$$\text{Де } r = \frac{L_p}{r_x} = \frac{257,3}{1,6 * 40} = 40,2 \text{ см}$$

Таким чином, $q = 4,5 \text{ кН/м}^2 < q_{кр} = 13,19 \text{ кН/м}^2$. Умова стійкості виконано.

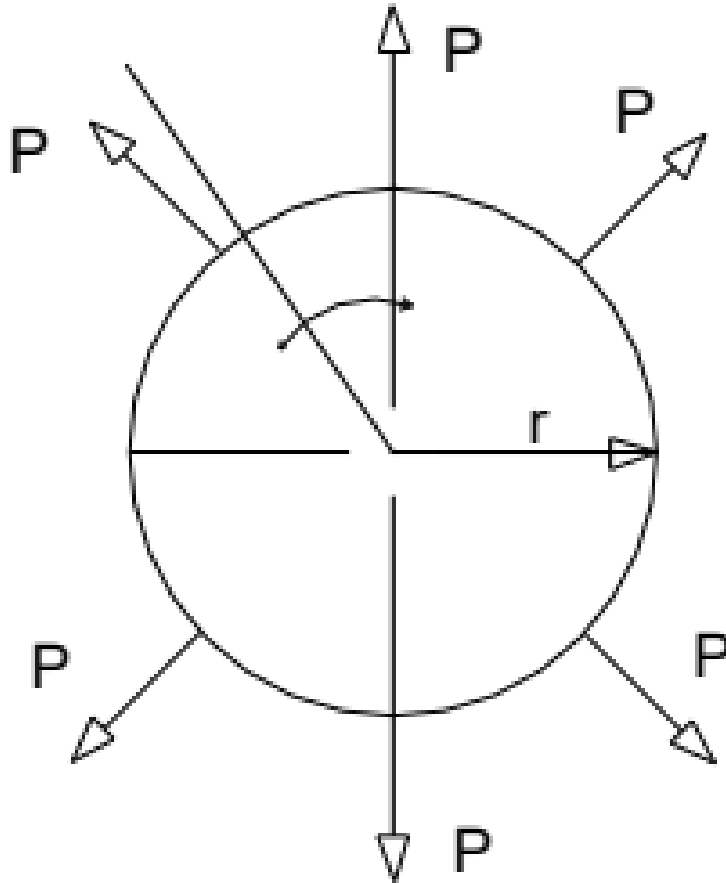


Рисунок 3.21- Схема завантаження вузла

Расчет узла шестилучевого коннектора.

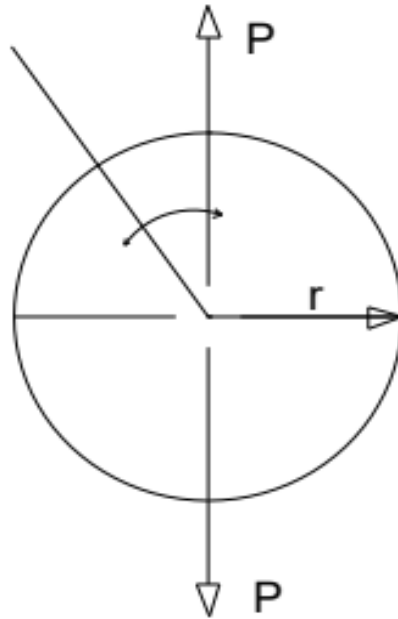


Рисунок 3.22 - Розрахункова схема вузла

$$L = \pi D_H = 3,14 * 0,377 = 1,18\text{м}$$

де D_H – зовнішній діаметр вузлового з'єднання.

Тоді навантаження дорівнюватиме :

$$q = \frac{6P}{l} = \frac{6 * 94,4}{1,18} = 480 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

$$N = qR = 480 * 0,1885 = 90,48 \text{ кН}$$

Перевіряємо міцність вузлового з'єднання.

$$\sigma = \frac{N}{F_{\text{пл}}} = \frac{94,4 * 10^{-3}}{0,377 * 0,012} = 20,86 \text{ МПа} < R_c = 24 * 0,9 = 21,6 \text{ МПа}$$

де $F_{\text{пл}}$ – площа труби з урахуванням послаблень.

Розрахунок вузла на дію однієї зосередженої сили. Визначити нормальну силу у трубі

$$N = -\frac{1}{2} P \sin \alpha = -\frac{12}{2} 94,4 * 1 = 47,2 \text{ кН}$$

Згинальний момент дорівнює:

$$M_{max} = 0,3183Pr_{cp} = 0,3183 * 94,4 * 0,1885 = 5,66 \text{ кН} * \text{м}$$

Перевірка вузла на міцність

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W_{пл}} + \frac{N}{F_{пл}} = \frac{5,066 * 10^{-3}}{0,377 * 0,26^2} + \frac{47,2 * 10^{-3}}{0,377 * 0,26} = 21,04 \text{ МПа} < R_c = 24 * 0,9$$

$$= 21,6 \text{ МПа}$$

Приймаємо трубу D-377x26 для шестипроменевого конектора.

3.4. Розрахунок купола сітчастого із залізобетону

Навантаження на купол із залізобетону приймаємо виходячи з даних:

Ребра каркаса = 1387 мп (перетин ребра прямокутного перерізу 20*10 см); Матеріал ребер – важкий бетон ($\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$);

Умовно візьмемо вагу конекторів рівним 20% від ваги ребер;

Площа, що перекривається куполом = $\pi R^2 = \pi R^2 = 12,5^2 \pi = 490,62 \text{ м}^2$;

Таблиця 3.5- Збір навантажень на 1 погонний метр

Вид навантаження	Нормативне навантаження, кН/м ²	Коеф фіцієнт надійності по навантаженню	Розрахункова навантаження, кН/м ²
Постійне навантаження:			
Навантаження від власної ваги куполу	7	1,1	7,7
Навантаження від ваги покрівлі	0,88	1,2	1,06
Разом:	6,98		7,77

Тимчасове навантаження:			
Снігова (IV район)	2	1,4	2,8
Вітрова (II район)	0,303	1,4	0,42

Статичний розрахунок проводимо у програмі Ліра-Сапр версія 2015 R15. Для визначення максимальних зусиль у купольній конструкції, у цій роботі, були прийняті навантаження та поєднання навантажень:

1. Власна вага + снігове навантаження (рівномірно розподілене).
2. Одностороннє навантаження снігового навантаження (для другого випадку снігового навантаження на купольну конструкцію як найбільш завантажене, отримане розрахунком наведеного в р.3.1.2).
3. Власна вага + вітрове навантаження.
4. Власна вага + одностороннє навантаження снігового навантаження.
5. Поєднання навантажень від власної ваги + одностороння.

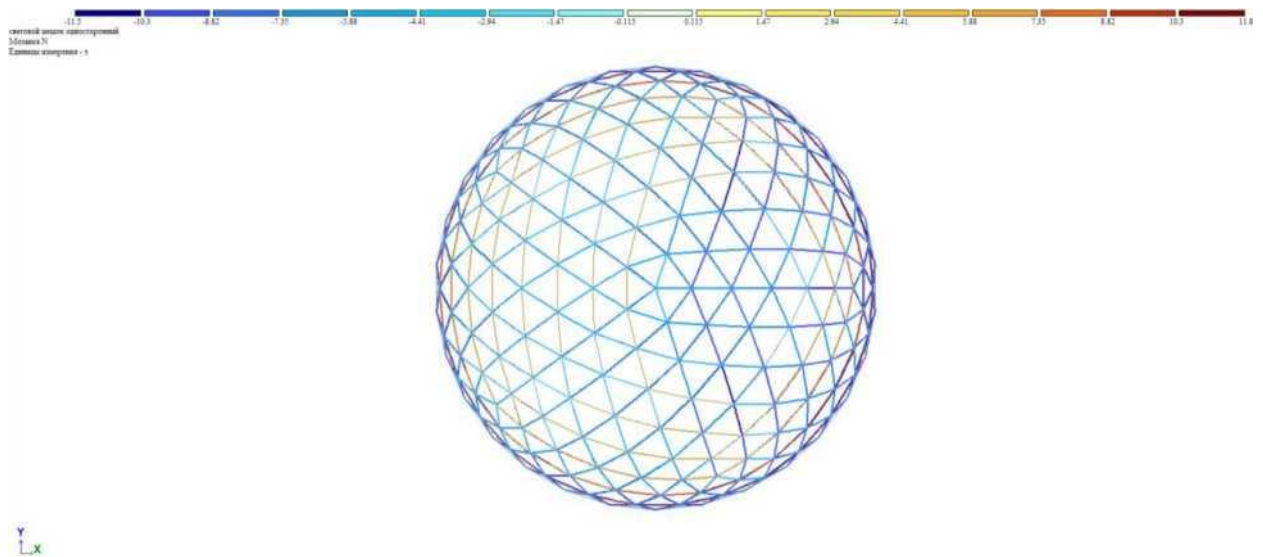


Рисунок 3.23 - Максимальні зусилля, що виникають у куполі сітчастим із залізобетону

За результатами розрахунку були встановлені максимальні зусилля в стержнях на стискування $N_c=11,8$ тонн (118кН), на розтягування $N_p=11,5$

тонни (115кН).

Максимальні переміщення у вузлах куполу при поєднанні зусиль із осі Z склало 8 мм. (рис.3.24)

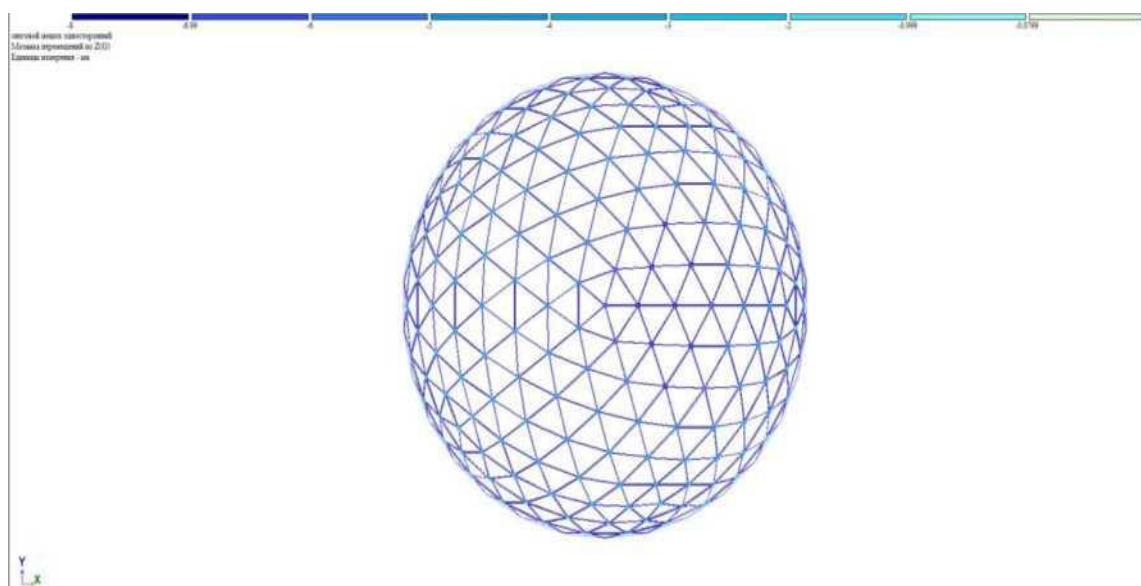


Рисунок 3.24 - Максимальні переміщення по осі Z, що виникають у куполі сітчастому із залізобетону.

Максимальний момент в стержнях куполу склав від $M = -0.197 \text{ т*м}$ ($-1,97\text{кН*м}$) $M=0.137 \text{ т*м}$ ($1,37\text{кН*м}$). (рис.3.25)

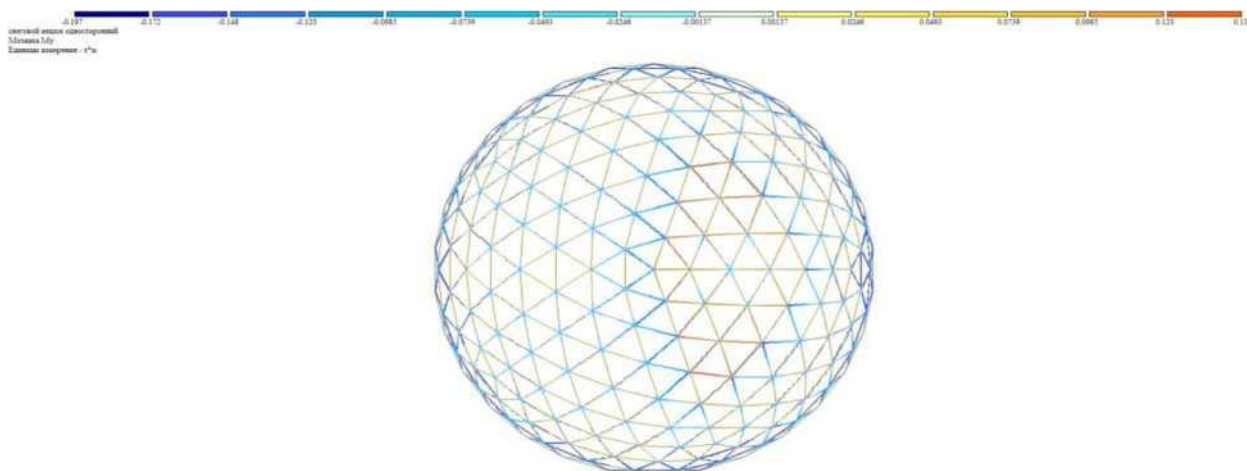


Рисунок 3.25 - Максимальний момент, що виникає в куполі сітчастим із залізобетону.

Розрахункові момент для поперечних сил в стержнях купола складає від $Q = -0.112\text{т}$ ($-1,12\text{кН}$) до $Q = 0.133\text{т}$ (1.33кН). (рис.3. 26)

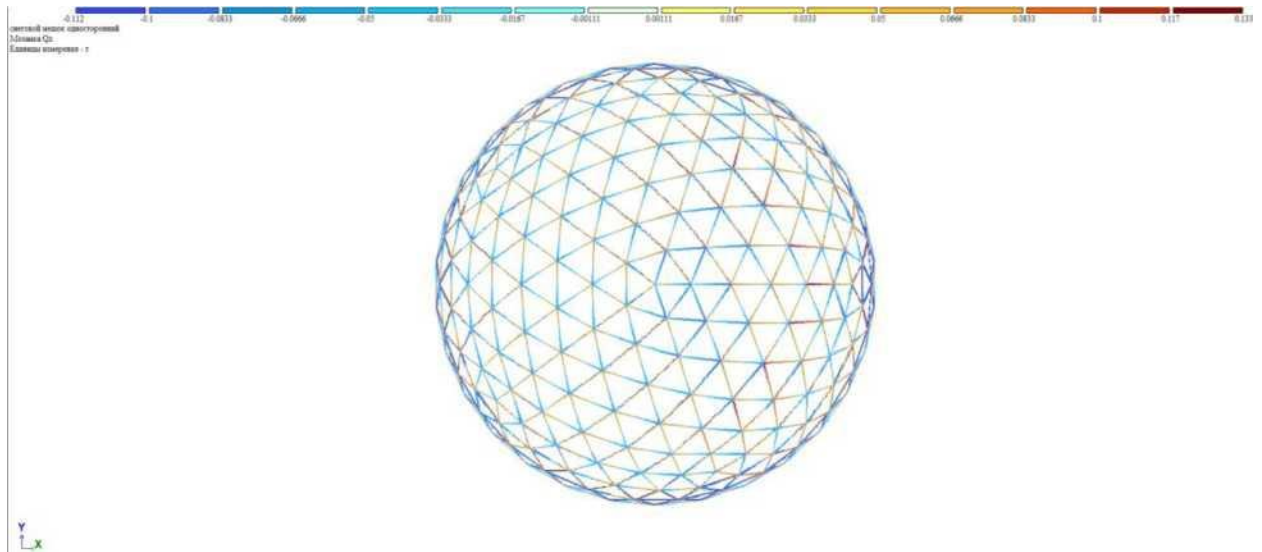


Рисунок 3.26 Розрахункові моменти для поперечних сил, що виникають у куполі сітчастому із залізобетону.

3.5 Висновок по розділу 3

1. При порівнянні ребер купола з деревини було встановлено, що доцільно для купола діаметром 25 метрів застосовувати деревину класу LVL [39], отримані в результаті розрахунку дані показали економію матеріалу у 1,63 рази. При порівнянні вартості деревини класу LVL ($340 \times 140\text{мм}$) та клеєної деревини (400×160) встановлено, що за вартості деревини класу LVL 42 т.р. та клеєної деревини 40 т.р. економія на деревину класу LVL становить близько 31%.

2. Цілісна деревина в розрахунок ребер каркаса купола не застосовувалася, зважаючи на обмеженість сортаменту і малим розрахунковим опором на розтяг і стиснення. При цьому доцільно застосування цілісної деревини у дощато-щитових настилах.

3. При порівнянні армованої деревини з деревиною класу LVL і клеєної деревини було встановлено, що при розрахунках каркаса купола на

розтягування показують своє чудово, однак, в одних і тих же ребрах купола в залежності від характеру завантаження можуть виникати як розтягувальні, так і зусилля стиск. При цьому армована деревина, що сприймає зусилля на стиснення, розраховується на зминання, що призводить до збільшення площі перерізу і як наслідок недоцільності застосування.

4. При порівнянні зусиль, що виникають у ребрах купола з металу було встановлено, що зусилля, що виникають від власної ваги, трохи перевищують зусилля від клеєної деревини.

5. Аналізуючи отримані результати в ребрах каркаса купола із залізобетону встановлено, що максимальні зусилля, що розтягують, вимагають збільшення площі перерізу на 32% по відношенню до стиснутої зони.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

На підставі проведених досліджень отримано наступні результати та зроблено відповідний висновок:

1. Статичний розрахунок купола слід проводити за деформованою схемою. Поздовжню жорсткість елементів слід обчислювати з урахуванням еквівалентного модуля деформації. За результатами статичного розрахунку в кожному елементі купола визначаються поздовжнє зусилля N і згинальні моменти в розрахункових перерізах. Далі розрахунок елемента купола проводиться як для позацентрово-стисненого або стисло-згинального елемента та з урахуванням жорсткого або шарнірного приєднання панелей.

2. У розглянутій конструкції витрата теплової енергії на опалення на 18-20 % менша за витрату енергії на опалення рівних їм за площею прямокутних споруд.

3. Виявлено залежність, що за змін стріли підйому, кільцеві зусилля на розтяг при однакових навантаженнях змінюються. Найбільш оптимальний кут для зменшення кільцевих зусиль на розтягування є не більше 60° , при цьому кільцеві зусилля зменшуються в 1,45 рази в порівнянні з кутом підйому 90° . ($N=11,5$ тонн до $N=6,25$ тонн для залізобетонного куполу) .

4. Для збільшення швидкості монтажу купольної конструкції з деревини та металу пропонується проводити укрупнювальну збірку конструкції сегментами, що не перевищують максимальної маси вантажопідіймального механізму вживаного для монтажу куполу. Приміром, для даного куполу сітчастого діаметром 25 метрів і стрілою підйому 12,5 метрів загальна маса металевого куполу з настилом складає 59,478 тонн, а середня вага елемента складає приблизно 95 кілограм, якщо при збірці розбити купол на 15 приблизно рівних частин 4 тонни. Розглядаючи ребра куполу з деревини класу LVL, загальна маса складає 43 тонни, а середня вага елемента складає 73,4 кілограма, у цьому варіанті розчленовування куполу можна розбити на 10 рівних частин. За таких умов монтаж куполу сітчастого

складу близько двох робітників змін для металу та деревини.

5. При розгляді залізобетонних елементів сітчастого купола встановлено, що складання купола слід проводити безпосередньо на місці монтажу. При цьому складність збирання полягає в збиранні лісів і виготовленні опалубки, а також замонолічуванні стиків. За такого принципу зборки та монтажу збільшуються трудовитрати та вартість робіт.

6. Розроблені та досліджені збірні купала-оболонки та структури із застосуванням запропонованих ефективних розрізок можуть застосовуватися для покриттів будівель різного призначення. У порівнянні з існуючими, ці конструкції мають максимум однотипних монтажних елементів, можливості укрупнювального складання та максимум естетичної якості при мінімумі збірних деталей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білик А.С., Пермяков В.О. Експертне моделювання вибору оптимальних рішень плоских сталевих зварних конструкцій // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди / Зб.наук.праць. Вип. 16, Ч.2, Рівне, 2008. – С. 295 - 302.
2. Хмельницький С.В. Автоматизація розрахунків покриттів із геодезичних куполів. Робота на здобуття ступеня маг.техн.наук. К.: КНУБА, 2012 - 124 с. (на правах рукопису).
3. Кліменко І.В. Металеві конструкції / І.В. Кліменко – К.: Вища школа, 1997. – 280 с.
4. Клименко Ф.Є. Металеві конструкції / Ф.Є. Клименко , В.М. Барабаш. –Львів.: Світ, 1994.-280 с.
5. Металеві конструкції: Загальний курс: Підручник для вищих навчальних закладів [Текст] / Нілов О.О., Пермяков В.О., Шимановський О.В., Білик С.І., Лавріненко Л.І., Бєлов І.Д., Володимирський В.О. Видання 2-е, перероблене і доповнене Під загальною редакцією О.О. Нілова та О.В.Шимановського. К.: Сталь, 2010. — 869 с.
6. 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
7. Niku - Lari A. Structural analysis system (Software - Hardware, Capaility - Compability - Aplications). pergamon Press, vol. 1-3, 1986.
8. Flyng dome; TR - 500 geodesic dome made of glass - fiber reinforset plastics panels // Plastic Word. - 1961. Miirch. - P. 21.
9. Fuller, R. B. Synergetics / R. B. Fuller. - New - York: London, 1975.
10. Richard Buckminster Fuller.- Archit. Design. 1961, vol. 31, N7, - P. 290319.

11. Купол торгової вулиці Такамацу Маругамечо [Електронний ресурс]. –Режим доступу : URL : <https://www.projectdesign.jp/201503/pn-kagawa/001997.php>
12. Попов В.О., Кошівський О.С. Розроблення скінчено-елементної моделі напружено-деформованого стану куполу з умовоптимального проектування. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник.Вінниця, ВНТУ, 2012-1. С. 11 – 15.
13. Карапузов Є.К. «Матеріали і технології в сучасному будівництві» К. Вища школа, 2004.
14. Клименко В.З. Конструкції з дерева і пластмас. – К.: Вища школа, 2000. – 304с.
15. Нілов О. О. Металеві конструкції. Загальний курс: підручник для вищих навчальних закладів. — Вид. 2 е, перероб. і доп. — К.: Сталь, 2010. — 869 сНіконов В. І., Антошкин В. Д. До завдання оптимізації розташування сферичних трикутників/Вісник Мордовського університету. 2015. - Т. 25. - № 1. - С. 24-29.
16. G. A. Korn, T. M. Korn. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers, 1151, 2000. 456 з
17. В. В. Різак. Конструкції з дерева і пластмас. Конспект лекцій. – Ужгород: УжНУ. – 75 с.
18. Технологія будівельного виробництва : підручник / В. К. Черненко, М. Г. Ярмоленко та ін. – Київ: Вища школа, 2002. – 430 с.
19. Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings. – 1995. - 124p
20. Павліков А. М. Залізобетонні конструкції: будівлі, споруди та їх частини : підручник. Полтава: ПолтНТУ, 2017. 284 с.
21. Пилипака Т.С. Аналітичне конструювання просторових та сферичних кривих у функції власної дуги. Геометричне та комп'ютерне моделювання. Харків : ХДУХТ, 2008. Вип. 21. С. 100–105.
22. Павлов Г. Н. Композиційне формоутворення кристалічних

куполів і оболонки // Архітектура СРСР.- 1977. - №2. - С. 30-41.

23. Пилипака С.Ф. Конструювання ізометричних сіток на поверхні кулі / С. Ф. Пилипака, І. Ю. Грищенко, О. В. Несвідоміна // Прикладна геометрія та інженерна графіка. 2018. Вип. 94. С. 82–87.

24. Сіянов О. І. Визначення переміщень вузлів металевих циліндричних стержневих покриттів за допомогою методу розкладання на плоскі грані і обчислювального комплексу SCAD / О. І. Сіянов, С. В. Риндюк // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : наук.-техн. збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2012. – № 1 (12). – С. 16–19.

25. Сіянов О. І. Металеві циліндричні стержневі покриття: конструювання та розрахунок : монографія / О. І. Сіянов. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 140 с.

26. Дудар І.Н. Довідник нормативно-технічних даних для проектів виконання комплексу робіт по зведенню надземної частини будівель та споруд. Навчальний посібник / Дудар І.Н., Потапова Т.Е., Прилипко Т.В. - . - Вінниця.:ВНТУ, 2006 -133 с.

27. Білик А.С. Автоматизація розрахунків покриттів зі сталевих геодезичних куполів [Текст] / А. С. Білик , С. В. Хмельницький // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – 2012. – Вип. 10. – С. 207–219.

28. Гнідець Б. Г. Збірно-монолітні куполи, монтвані навісним методом / Гнідець Б. Г., Вендзилович О. М., Давидович М. І. // Вісник ЛТВ Академії будівництва України. – 2008. – № 4. – С. 17–23.

29. Пат. 50819 Україна, МПК 7 E04 G 11/04. Спосіб зведення оболонки / М.Й. Коляков, О.А. Гофштейн, О.Л. Болдар, В.М. Левченко. - № 99105586; Заявл. 13.10.99; Опубл. 15.11.2002, Бюл. № 11 – 18 с. ил.

30. Болдар О.Л. Тришарова збірно-монолітна конструкція куполів "ГІПСОПЛАСТОН" // Матеріали конференції молодих вчених "Архітектура та будівництво третього тисячоліття". – К.: КиївЗНДІЕП. – 2002. – С.44-47.

31. ДСТУ EN 385:2001 З'єднання дерев'яних конструкцій шипові.

Функціональні та мінімальні виробничі вимоги (prEN 385:2001, IDT)

32. Коляков М.Й., Болдар О.Л. Особливості технології зведення тришарової конструкції купола “ГПСОПЛАСТОН” // Будівництво України. – 2002. - № 2. –С.27-30.
33. Мурашко Л. А. Розрахунок за міцністю перерізів нормальних та похилих до поздовжньої осі згинальних залізобетонних елементів за ДБН В.2.6-98:2009 / Мурашко Л. А. , Колякова В.Н., Сморкалов Д.В. – Київ :КНУБА, 2012. – 62 с.
34. ДСТУ Б В.1.2-3:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення.Вимоги проектування.- К.: Мінрегіонбуд, 2006.
35. ДБН В.2.6-163:2010 Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу, чинний з 01.12.2011. - К.: Мінрегіонбуд,2011.
36. ДБН В.1.2-14-2009 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів, чинний з 01.12.2009. - К.: Мінрегіонбуд, 2009.
37. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи, чинний з 01.01.2007. - К.: Мінрегіонбуд, 2006.
38. Таблиці для вычисления прямоугольных координат углов рамок трапеций в проекции Гаусса – Крюгера на эллипсоиде Красовского. М., ГУГК,1948.
39. Кархут І. І. Досвід нетипового проектування, Вісник Львівського територіального відділення Академії будівництва України : [до 15-річчя Львівського відділення Академії будівництва України], Академія будівництва України, Львівське територіальне відділення, Львів, 2010, № 5/10, С. 121-124.
40. Борисенко В.Д. Об'ємне моделювання в AutoCAD: навчальний посібник/ В.Д. Борисенко, О.Г. Бідніченко, І.В. Устенко. – Миколаїв: ФОП Швець В.Д.,2014. – 224 с.
41. El Damatty A. A., Nassef A. O. A finite clement optimization technique to determinate critical imperfections of shell structures// Struct Multidisc optim 23, Springer - Verlag 2001. - P. 75-87

42. Fuller R.B. Geodesic dome // *Perspecta*. 1952, no. 1, pp. 30–33.
43. V. A. Dzyuba, P. O. Steblyanko, J. Science and Education a New Dimension. *Natural and Technical Sciences*, II(4) No 32, 41(2014).
44. Dubina, D., ViorelUngureanu, Raffaele Landolfo. Design of cold-formed steel structures: Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3 – Design of cold-formed steel structures, First Edition. Berlin : Ernst & Sohn, 2012. 676 pp.
45. Wei-Wen Yu., Roger A. LaBoube. Cold-formed steel Design. N.Y. : John Wiley & Sons, 2010. 489 pp.
46. Lebed E.V. Начальные усyлия в двукрошныкх металлыческыкх куполах yz-za pohreshnostei yzghotovlenyia y montazha ykh konstruktsyi / E.V. Lebed, A.A. Hryhorian // *Vestnyk*, 2015. – № 4. – S. 69-79
47. Банах А.В., Бездольний О.Г., Гребенюк О.В. Покриття будівель та споруд із застосуванням сітчастих сферичних оболонок // *Матеріали ІІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України»*. - Запоріжжя : ЗНУ, 2023. –С.167-168.