

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра будівельних конструкцій

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
Будівельних конструкцій

/...../

підпис

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження роботи криволінійного структурного
покриття»

»

Виконав (ла)

(підпис)

Рева Є.Є.

(Прізвище, ініціали)

Група

(Науковий)

керівник

(підпис)

Срібняк Н.М.

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2024 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: будівельних конструкцій

Спеціальність: 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Рева Євген Євгенович

**Тема роботи: Дослідження роботи криволінійного
структурного покриття**

Затверджено наказом по університету № _____ від "___" _____ 2024р.

Строк здачі студентом закінченої роботи: "___" _____ 2024 р.

Вихідні дані до роботи:

Об'ємо-планувальне вирішення сітчастої стержньової оболонки типу
купол

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)

Виконати огляд джерел щодо особливостей роботи та проектування сітчастих оболонок типу геодезичний купол. Створити СЕ п'яти сітчастих куполів, що відрізняються видом твірної поверхні та частотою розбивки поверхні. Проаналізувати напружено-деформований стан обраних будівельних систем. Визначити конструкцію, що буди мати найменшу матеріалоемність. Сформулювати висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точною вказівкою обов'язкових креслень)

Мультимедійна презентація в форматі Microsoft PowerPoint

Керівник :

(підпис)

Н.М. Срібняк

(Прізвище, ініціали)

Консультант

(підпис)

О.П. Луцьковський

(Прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання:

Здобувач

(підпис)

Є.Є. Рева

(Прізвище, ініціали)

Анотація

Рева Євген Євгенович. Дослідження роботи криволінійного структурного покриття – Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2024.

Робота складається із змісту, загальної характеристики роботи та її кваліфікаційних ознак, огляду досліджень за обраною темою, розділів основної частини, висновків за результатами досліджень та формулювань висновків із досліджень (українською та англійською мовами).

Сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, методи наукового дослідження.

Результати досліджень Результати числових розрахунків дозволяють визначити з-поміж розрахункових моделей сітчастих оболонки, які досліджуються, найбільш ефективну модель за критерієм матеріалоемності, тобто визначити модель із найменшою вагою.

Аналіз публікацій та досліджень встановив, що купольні споруди, зокрема сітчасті куполи є ефективними вирішеннями будівель в громадському та житловому будівництві. Світ вперше дізнався про геодезичний купол у 1951 році, коли Фулер запатентував свій винахід. Сьогодні геодезичні куполи визнані у всьому світі як одні з найефективніших будівельних систем.

Цю ефективність підтверджує й світова практика архітектурно-будівельного проектування, в якій геодезичні куполи визнані найбільш

раціональними та ефективними з точки зору статичної роботи сітчастими оболонковими системами.

Тому дослідження сітчастих куполі є **актуальною задачею** та ця тема має значний потенціал для розвитку.

В **основній частині** наведено опис п'яти скінченоелементних схем стержньових сітчастих оболонок покриття типу геодезичний купол (одна оболонка з-поміж п'яти прийнята як стратодезичний купол). Геометричні параметри оболонок прийняті однакові – діаметр (проліт) конструкції становить $D = 20,0$ м, висота стріли підйому – $h = 14,4$ м.

Куполи відрізняються видом твірної, при обертанні якої навколо вертикальної осі утворюється купольна поверхня обертання. Прийнято дві типи твірної- дуга кола, дуга еліпсу. Також прийнято два типи розбивки поверхні купольної оболонки – октаедрична та ікосаедрична. Останню, п'яту модель сітчастого куполу прийнято стратодезичним з твірною у вигляді частини дуги кола.

Таким чином прийнято до числового дослідження такі моделі купольних сітчастих оболонок: геодезичний сферичний з розбивкою ікосаедр (модель №1), геодезичний сферичний з розбивкою октаедр (модель №2), геодезичний еліптичний з розбивкою ікосаедр (модель №3), геодезичний еліптичний з розбивкою октаедр (модель №4), стратодезичний купольний (модель №5).

Конструкція шарнірно кріпиться до фундаменту та завантажена вертикальним навантаженням. Параметри жорсткості (профіль труби), що формують криволінійну поверхню куполу та опірне кільце є однаковими.

В результаті статичного розрахунку проаналізовано показники напружено-деформованого стану чотирьох моделей, оцінена їх стійкість, автоматизованим способом в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР підібрані нові профілі стержньових елементів сітчастих куполів. Згідно нових перерізів обчислено вагу кожної моделі.

У **висновках** встановлено, що за критеріями розподілу зусиль в елементах модель №1 можна відзначити як найбільш ефективну та найбільш стійку. Але за критерієм технологічності найбільш ефективною моделлю купол за схемою №1 не можна визначити, оскільки згідно його конструктивних особливостей буде присутньою найбільша кількість коннектів. Це значно збільшує вартість монтажу конструкції (велика частота розбивки його поверхні) та великі працевитрати під час зведення конструкції.

Зважаючи на критерій ваги, найлегшою конструкцією буде модель №2 геодезичного сферичного куполу з розбивкою за октаедрами. Хоча така модель не відрізняється найменшими показниками напруженого стану, але вирішальну роль в кінцевій вазі відіграє саме частота розбивки поверхні, тобто загальна довжина стержнів, що формують поверхню. Ця вага для моделі №2 є найменшою, що й обумовлює загальну найменшу її вагу з-поміж усіх інших моделей, що досліджувалися.

Ключові слова: геодезичний купол, стратодезичний купол, сферичний купол, еліптичний купол, частота розбивки, октаедр, ікосаедр, матеріалоемність. сітчаста оболонка

В **додатках** наведено; альбом слайдів мультимедійної презентації.

Структура роботи. Робота складається з основного тексту на 45 сторінках, у тому числі 10 таблиць, 35 рисунків. Текст роботи містить 6 розділів, що включають загальну характеристику роботи й висновки, список з 28 джерел, 1 додаток на 30 сторінках. Графічна частина складається з 30 слайдів мультимедійної презентації.

Abstract

Reva Yevhen Yevhenovych. Study of the performance of a curved structural coating – Master's qualification work with manuscript rights.

Master's qualification work in specialty 192 "Construction and civil engineering". – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2024.

The manuscript consists of the *table of contents, general characteristics of the work and its qualification features, a review of research on the chosen topic, sections of the main part, conclusions based on the results of research and formulation of conclusions from research* (in Ukrainian and English).

The **goal, tasks, object and subject of research, methods of scientific research** are formulated.

The **results of numerical analyses** make it possible to determine the most efficient model among the mesh shells under study according to the material consumption criterion, i.e., to determine the model with the lowest weight.

An **analysis of publications** and research has established that domed structures, in particular mesh domes, are effective building solutions in public and residential construction. The world first learned about the geodesic dome in 1951, when Fuller patented his invention. Today, geodesic domes are recognised worldwide as one of the most efficient building systems.

This effectiveness is also confirmed by the global practice of architectural and construction design, in which geodesic domes are recognised as the most rational and efficient mesh envelope systems in terms of static performance.

Therefore, the study of mesh domes is an urgent task and this topic has significant potential for development.

The **main part** of the paper describes five finite element schemes of rod mesh shells of the geodesic dome type (one shell among the five is taken as a stratodome). The geometrical parameters of the shells are the same: the diameter (span) of the structure is $D = 20.0$ m, the height of the lifting boom is $h = 14.4$ m.

The domes differ in the type of the forming part, which rotates around the vertical axis to form a dome surface of rotation. There are two types of forming elements: the arc of a circle and the arc of an ellipse. There are also two types of partitioning of the surface of the dome shell: octahedral and icosahedral. The last, fifth model of the mesh dome is assumed to be stratodesic with the constituent part in the form of a part of the arc of a circle.

Thus, the following models of dome mesh shells were accepted for numerical study: geodesic spherical with an icosahedron breakdown (model No. 1), geodesic spherical with an octahedron breakdown (model No. 2), geodesic elliptical with an icosahedron breakdown (model No. 3), geodesic elliptical with an octahedron breakdown (model No. 4), stratodesic dome (model No. 5).

The structure is hinged to the foundation and loaded with a vertical load. The stiffness parameters (pipe profile) forming the curved surface of the dome and the support ring are the same.

As a result of static analysis, the stress-strain state of the four models was analysed, their stability was assessed, and new profiles of the core elements of mesh domes were selected in the 'Metal' module of the Lira CAD software. According to the new sections, the weight of each model was estimated.

The **conclusions** established that, according to the criteria of force distribution in the elements, model No. 1 can be noted as the most efficient and most stable. However, according to the criterion of manufacturability, the dome according to

scheme No. 1 cannot be considered the most efficient model, since, according to its design features, the largest number of connections will be present. This significantly increases the cost of installation of the structure (high frequency of breaking its surface) and high labour costs during the construction of the structure.

Taking into account the weight criterion, the lightest structure will be model No. 2 of the geodesic spherical dome with a breakdown by octahedra. Although this model does not have the lowest stress state, the frequency of surface breakdown, i.e. the total length of the rods forming the surface, plays a decisive role in the final weight. This weight for model No. 2 is the smallest, which determines its overall lowest weight among all the other models studied.

Keywords: geodetic dome, stratodetic dome, spherical dome, elliptical dome, frequency of spacing, octahedron, icosahedron, material consumption, mesh shell

In the **appendices** are given an album of multimedia presentation slides.

Structure of manuscript. The manuscript consists of the main text on 45 pages, including 10 tables and 35 figures. The text of the paper contains 6 chapters, including a general description of the work and conclusions, a list of 28 references, and 1 appendix on 30 pages. The graphic part consists of 30 slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

<i>Завдання</i>	
<i>Анотація</i>	
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ	
<i>1.1 Актуальність теми</i>	
РОЗДІЛ 2. БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ	
<i>2.1 Історія розвитку купольних поверхонь. Переваги сітчастих геодезичних куполів</i>	
<i>2.2 Аналіз публікацій та досліджень, що існують</i>	
<i>2.3 Дослідження ефективних форм оболонок</i>	
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	
РОЗДІЛ.4 ВИДИ ГЕОДЕЗИЧНИХ КУПОЛІВ. ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ЦЬОГО ТИПУ КУПОЛІВ	
<i>4.1 Фулерівська геометрія</i>	
<i>4.2 Переваги й недоліки сітчастих куполів геодезичного типу</i>	
РОЗДІЛ.5 МОДЕЛЮВАННЯ СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНИХ СХЕМ ПРИ ВИКОНАННІ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ	
<i>5.1 Алгоритм виконання дослідження із використанням методу скінчених елементів</i>	
<i>5.2 Моделювання розрахункових схем сітчастих куполів</i>	
<i>5.2.1 Характеристики жорсткості та граничні умови</i>	
<i>5.2.2 Навантаження на конструкцію</i>	
<i>5.2.3 Типологія скінченоелементних розрахункових схем</i>	
РОЗДІЛ 6. РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ МОДЕЛЕЙ	
<i>6.1 Аналіз деформативності моделей</i>	
<i>6.2 Аналіз стійкості моделей</i>	
<i>6.3 Аналіз напруженого стану моделей</i>	
.....	

6.4. Аналіз ефективності використання попередньо прийнятих перерізів елементів.....	
6.5 Підбір нових перерізів оболонки після 1-го ітераційного розрахунку в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР	
ВИСНОВКИ.....	
Література.....	
Додатки.....	
Додаток 1. Графічний матеріал (презентація)	

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

1.1 Актуальність теми

Історія людської цивілізації — це шлях експериментів з матеріалами та конструкціями. Людина, комбінуючи їх у різні способи, намагалася досягти максимального ефекту за мінімальних витрат. І жодна інша особа не наблизилася до цієї мети так сильно, як Бакмінстер Фулер — математик, філософ, інженер, поет та історик, і, зокрема, винахідник геодезичних куполів.

Світ вперше дізнався про геодезичний купол у 1951 році, коли Фулер запатентував свій винахід. Сьогодні геодезичні куполи визнані у всьому світі як одні з найефективніших будівельних систем.

Цю ефективність підтверджує й світова практика архітектурно-будівельного проектування, в якій геодезичні куполи визнані найбільш раціональними та ефективними з точки зору статичної роботи сітчастими оболонковими системами.

Тому дослідження сітчастих куполів є **актуальною задачею** та ця тема має значний потенціал для розвитку.

Метою числового дослідження є аналіз ефективності тієї чи іншої моделі куполу (геодезичного стратодезичного) за декількома критеріями – напружено-деформованого стану, матеріалоемності.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі **завдання**:

- вивчення історії виникнення та розвитку геодезичних й стратодезичних куполів;
- ознайомлення із геометрією та особливостями формоутворення різних типів геодезичних куполів; ознайомлення також з можливими конструктивними рішеннями та методами їх зведення;
- обрання до дослідження розрахункових схем сітчастих куполів;
- проведення числового дослідження з розрахунку скінченоелементних схем стержневих куполів за допомогою ПК «Ліра».

Об'єкт дослідження – розрахункові скінченоелементні моделі обраних типів стержневих сітчастих геодезичних та стратодезичного куполів-оболонок.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан скінченоелементних моделей, вага моделей, що досліджуються.

Практичне значення результатів, що отримані

Результати числових розрахунків дозволяють визначити з-поміж розрахункових моделей сітчастих оболонок, які досліджуються, найбільш ефективну модель за критерієм матеріалоємності, тобто визначити модель із найменшою вагою.

РОЗДІЛ 2

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Історія розвитку купольних поверхонь. Переваги сітчастих геодезичних куполів

Головним конструктивним елементом геодезичних куполів є трикутник, що надає їм суттєву стійкість до великих навантажень, наприклад, до тиску снігу. Сфера, порівняно з іншими геометричними фігурами, має найбільший об'єм при однаковій площі поверхні, що дозволяє значно зекономити матеріали під час будівництва таких конструкцій [18].

До недавнього часу адаптація куполів під потреби приватних забудовників ат домовласників стикалася з труднощами через відсутність необхідної проектно-технічної документації, стандартних елементів купольних конструкцій та кваліфікованих будівельників, здатних працювати з такими об'єктами. Проте сьогодні на будівельному ринку США та Канади є все необхідне: від стандартних комплектів купольних будинків до компаній, що займаються їх монтажем і продажем. Така мережа охоплює обидві країни, що робить житловий купол звичним елементом будівельної реальності Північної Америки.

Така оболонка як геодезичний купол не потребує стін, що несуть, для підтримки перекриття, що відкриває безліч варіантів для організації інтер'єру в підкупольному просторі. Особливості поширення звуку та світла, переваги в ергономічності, нетрадиційні для житлового простору склепіння, схожі на храмові, новаторські ідеї в дизайні елементів інтер'єру та, звісно, енергоефективність також збільшують цінність будинку типу купол. Безсумнівний інтерес викликає і зовнішній вигляд такої будови: оболонка-купол гармонійно може бути «вмонтована» до будь-якого ландшафту. Розподіл навантажень по поверхні оболонки-купола дозволяє зменшити кількість трикутних пластин, що підтримують опорне кільце, на 50%. (Більшість фабричних купольних комплектів мають зменшену кількість трикутників з 30 до 15.) Отвори, що не несуть навантаження, можна використовувати для облаштування дверних і віконних прорізів, а також для створення, й також веранд, тамбурів, чи заскленних зимових садів.

Геодезичний купол являє собою це не просто набір трикутників, з'єднаних особливим способом. Геометрична симетрія забезпечує поєднання міцності й компактності, створюючи ефект виняткової новизни. Сферична поверхня, як відомо, є оптимальним способом охоплення заданого об'єму за допомогою найменшої площі поверхні. Тому півсфера є найбільш ефективною формою для перекриття певної площі. Якщо півсферу трансформувати в паралелепіпед, то в результаті буде втрачено від 20 до 30% простору інтер'єру. Перетворивши цю коробку в трьохгранну піраміду, втрати простору складуть вже 66%.

Форма будівлі є основним чинником, що визначає її енергоефективність. Саме загальна площа поверхні огорожень (стіни та покрівля), а не товщина теплоізоляції, наявність подвійних стекол, тип дверей, опалювальних приладів чи системи опалення, впливає на кількість тепловтрат. Сферична поверхня має здатність розсіювати світло, в той час як прямокутна – поглинати його.

Звук у межах купола розподіляється більш рівномірно, оскільки мінімальна площа огорожувальної поверхні зменшує проникнення шумів ззовні. Та частина звуків, яка все ж потрапляє всередину, значно ефективніше поглинається завдяки багаторазовим відбиттям від різних точок внутрішньої сферичної поверхні, що відбувається набагато краще, ніж у прямокутних приміщеннях.

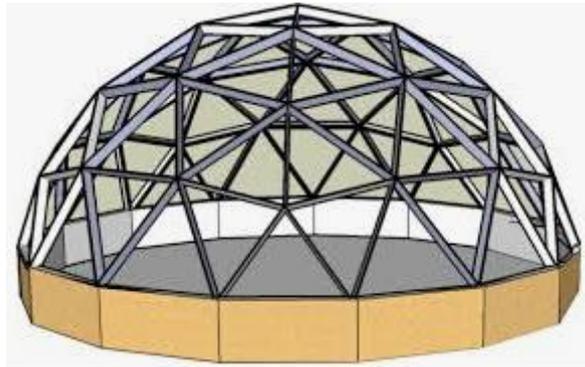


Рис.2.1 Енергозберігаючий будинок, каркас геодезичного купола 8 м [2]

Обтічна форма купола й відсутність площин фасаду забезпечують конструкції рівномірний розподіл природних навантажень, таких як сніг, вітер чи сейсмічні впливи.

Складний рельєф та суворі природні умови не становлять перешкод для купольних конструкцій. Уже понад чверть століття в Антарктиді успішно використовуються радарні установки, в основі яких лежать геодезичні куполи [1].

У 1920-х роках німецький інженер та вчений В.Бауерсфельд спроектував перший геодезичний купол із залізобетону для планетарію компанії Zeiss Optical Works у місті Єна, Німеччина.

У 1940-х роках Бакмінстер Фулер, спираючись на структуру давньогрецького ікосаедра, створив геодезичний купол, також відомий як Дімаксіон, призначений для архітектурного застосування. Використавши ікосаедричний купол як основу для картографічної проєкції, **він став єдиною людиною у світі, яка отримала патент за метод картографування** (нині його можна вважати текстурокартографічним алгоритмом). Пізніше виявлені

складні високоміцні багатогранні молекули були названі на його честь бакмінстер-фулеренами, або просто баки-болами.

Економічна ефективність куполів у вирішенні житлових проблем виявилася недосяжною. Основна причина полягає в тому, що ідеальна задумка вимагала й такого ж бездоганного виконання, яке далеко не завжди вдавалося реалізувати. До того ж навіть добре збудовані купольні конструкції часто не відповідали архітектурно-планувальним вимогам передмість. Використання нестандартного каркасу створювало труднощі з технічним нормуванням і отриманням дозволів. Крім того, вбудовування дверних і віконних блоків у конструкцію часто порушувало її міцність і знижувало енергоефективність споруди [1].

Лише в 1996 р. було винайдено **стратодезичні** куполи (рис. 2.2).

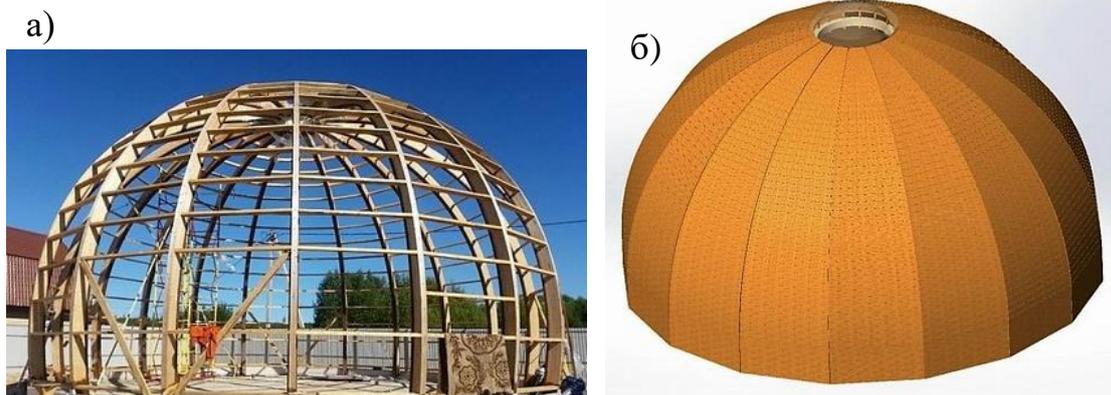


Рис. 2.2 Приклади стратодезичних куполів [3]

Стратодезичні куполи, як і геодезичні, є багатогранними, проте їх головна відмінність полягає в типі симетрії: геодезичні куполи базуються на радіальній симетрії, тоді як стратодезичні мають осьову симетрію. Геодезичні куполи краще витримують навантаження, вектори яких сходяться в центрі початкової сфери, тоді як стратодезичні конструкції більш ефективно протидіють вертикальним навантаженням. З точки зору архітектури та конструктивних властивостей, стратодезичні куполи вважаються кращими.

Осьова симетрія дозволяє поділити купол на значно більшу кількість горизонтальних шарів, що обмежені паралельними площинами, порівняно з радіальною симетрією. Це робить стратодезичні куполи більш адаптованими як до традиційних методів будівельного проектування, так і до потокових технологій складання.

Геодезичні куполи як правило змонтують із дерев'яних балок, з'єднуючи їх конекторами із сталі (рис.2.3,а) [3]. Куполи стратодезичного типу як житлові конструкції збирають з гнуклеєних балок (рис.2.3,б).



Рис.2. 3 Приклади вирішення геодезичних (а) та стратодезичних (б) куполів

2.2 Аналіз публікацій та досліджень, що існують

Геодезичний купол — це конструктив, що утворений з конструктивних елементів, які представляють собою геодезичні криві лінії, що перетинаються й з'єднуються, а також кола, утворені перетином сфери центральними площинами [10]. Існують відомі дослідження, присвячені геодезичним розбивкам поверхонь [13-17], архітектурному проєктуванню геодезичних куполів [12], оптимізації поверхонь куполів [18-22, 24-26], а також аналізу їхньої міцності та стійкості [15,19].

Перші публікації, присвячені практичному використанню геодезичних оболонок, належать американському інженеру Бакмінстеру Фулеру (1952 р.). Ці дослідження зосереджувалися на геометричній проблемі розбивки геодезичних куполів на елементи, що вимагало значних математичних обчислень, складність яких суттєво зростала зі збільшенням прольоту споруди.

Річард Бакмінстер Фулер у 1940-х роках отримав кілька патентів на свої винаходи, в тому числі й на геодезичні куполи. Згодом його дослідження здобули міжнародне визнання, хоча до сьогодні його ідеї часто критикують і вони не отримали широкого застосування. На жаль, їх досі рідко використовують у будівництві житла, хоча основною метою Фулера в післявоєнний період було створення доступного та швидкокомнатного житла для людства [19].

Подальші розробки (автори І.В. Ломбардо, В.В., Г.Н. Павлов, Єрмолаєв, А.Н. Косолапов, В.Є. Михайленко, та інші) призвели до створення системи автоматизованого формування геометричних моделей одноконтурних й двоконтурних геодезичних оболонок на базі ArchiCAD [14, 15]. Ця система дозволяє вибирати вид розбивки з бібліотеки, отримувати візуалізацію оболонки та створювати документацію на елементи купола.

Також проводяться дослідження з використання триангуляції для розбивки поверхонь [23, 24, 27]. Водночас залишається недостатньо

опрацьованим трудомісткий етап проєктування — розрахунок оболонки на міцність і стійкість.

Для інтеграції цих операцій в загальний цикл автоматизованого проєктування геодезичних оболонок можна використовувати сучасні потужні спеціалізовані програмні комплекси (такі як Nastran, Ansys, Robot Structure, Sofistik тощо). Однак для цього необхідно перетворити геометричну модель оболонки у формат, який буде зрозумілим для розрахункових систем.

Попередньо згенерувати будь-яку криволінійну поверхню, в тому числі й купольну, можна використовуючи ПК, що підтримують параметричне програмування (як то Rhino).

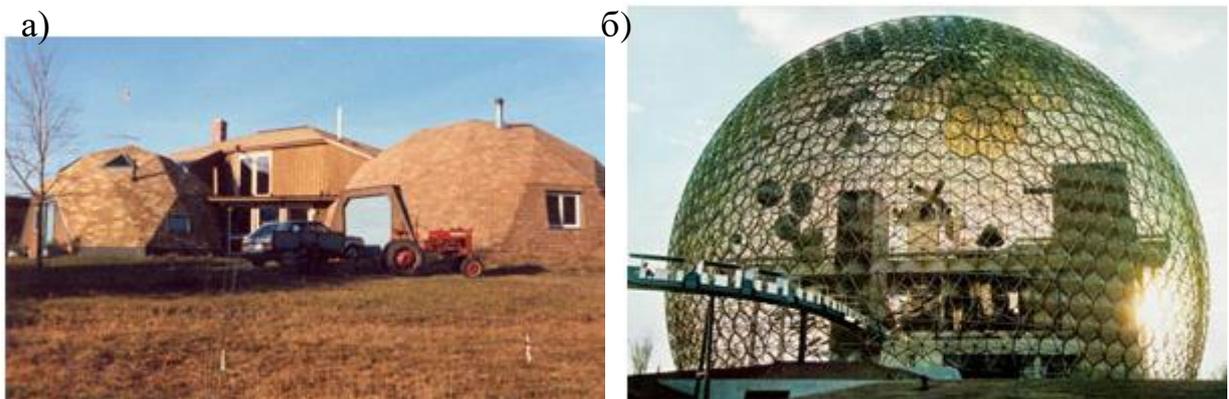


Рис.2.4 Приклади геодезичних куполів, що зведені: окреслений за тетраедром (а); купол - павільйон США на Всесвітній виставці в Монреалі (б)

Багато куполів стали відомими за цей час. В 1967 році – павільйон США на Всесвітній виставці в Монреалі (рис. 2.4, б). Багато компаній спробували свої сили в створенні купольних конструкцій, серед яких найвідоміші – Natural Spaces Domes і PacificDomes. Ці компанії розпочали свою діяльність у 70-х роках минулого століття.





Рис.2.5. Сучасність. Застосування геодезичних куполів

Компанія «Natural Spaces Domes» розробила спеціальні шаблони для зовнішніх панелей, які дозволяють значно знизити витрати на матеріали. Крім того, її експерти створили унікальну систему з'єднувальних елементів, яка дозволяє швидко збирати та розбирати конструкції. Спеціалісти проектного та дизайнерського бюро Pacificdomes розробили кілька сферичних екранів і виставкових комплексів, які використовуються як в тропічних регіонах, так і в Антарктиці.

Перевага таких конструкцій полягає в більшому обсязі внутрішнього простору та підвищеній міцності. Для їх зведення можна використовувати прості та легкі матеріали. Зі збільшенням об'єму конструкції її міцність також зростає завдяки рівномірному розподілу навантаження по всій поверхні, що дозволяє будувати куполи величезних розмірів. Наприклад, купол діаметром до 50,0 метрів можна зібрати за кілька днів за допомогою невеликої команди робітників, без використання спеціальної техніки.

Основною проблемою на сьогодні є відсутність матеріалів, розроблених спеціально для геодезичних куполів. Всі виробництва будконструкцій переважно орієнтовані на виготовлення чотирикутних конструкцій, що призводить до додаткових труднощів при обробці матеріалів і збільшення кількості відходів.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи, використані в дослідженні, обрано відповідно до його мети та поставлених завдань:

1. Метод аналізу

1. Оцінка даних про сталеві сітчасті оболонки типу купол, їхню поведінку під навантаженням та стійкість криволінійних поверхонь. Проведено аналіз рекомендацій щодо вибору оптимальних параметрів розрахунку та досліджено фактори, що впливають на зміну й перерозподіл зусиль у конструктивних елементах сітчастих куполів.

2. Метод скінчених елементів в механіці конструкцій

Метод скінченних елементів (МСЕ) — це математичний інструмент для числового розв'язання складних задач у механіці будівельних конструкцій. Він широко застосовується для аналізу як статично визначуваних, так й статично невизначуваних систем. У цьому методі структурна модель представлена у вигляді набору скінченних елементів, пов'язаних між собою у вузлах (дискретних точках). Елементи моделі можуть мати різні фізичні властивості, такі як товщина, щільність, коефіцієнт теплового розширення, модуль пружності, модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона. У даному дослідженні МСЕ застосовано для визначення напружено-деформованого стану купольних оболонок сітчастого типу та оцінки їх стійкості.

3. Методика підбору перерізів сталевих елементів за нормами [2]

Підбір перерізів стержнів сітчастих оболонок здійснюється відповідно до норм й рекомендацій проектування сталевих конструкцій [2].

- Для розтягнутих стержнів спочатку обчислюють необхідну площу поперечного перерізу за формулою (3.1), після чого вибирають переріз із сортаменту, визначаючи його геометричні характеристики.

$$A_H = \frac{N}{R_y \gamma_c} . \quad (3.1)$$

- Для стиснутих стержнів застосовують формулу (3.2), яка враховує необхідну площу для елементів, які зазнають центрального стиску.

$$A_H = \frac{N}{\varphi R_y \gamma_c}, \quad (3.2)$$

Ця методика реалізована в модулі «Метал» постпроцесора ПК Ліра-САПР, що дозволяє автоматизувати процес підбору профілів із перевіркою умов міцності, стійкості та жорсткості відповідно до розрахунків за 1ГС та 2ГС.

4. Аналітична обробка результатів розрахунків

Обробка та аналіз результатів виконуються із використанням програмного забезпечення Microsoft Excel (рис. 3.1).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2											
3						поверхня					
4			№ схеми	Поперед-							
5			ньо прий	Сталь	Профіль т	Вага 1м.п	Довжина	Вага, т			
6			1	ТБ 102х4,5	ТЕ 89х4	0,00838	677,13	5,6743494			
7			2	С245	ТЕ 89х4	0,00838	416,91	3,4937058			
8			3		ТЕ 89х4	0,00838	802,72	6,7267936			
9			4		ТЕ 89х4,5	0,00938	494,32	4,6367216			
10			5		ТЕ 89х4,5	0,00938	520,8	4,885104			
11											
12						опорний пояс					
13			№ схеми	Поперед-							
14			ньо прий	Сталь	Профіль т	Вага 1м.п	Довжина	Вага, т			
15			1	ТБ 102х4,5	ТЕ 89х4	0,00838	62,6	0,52	677,65	68,27	
16			2	С245	ТЕ 89х4	0,00838	62,4	0,52	417,43	65,89	

Рис. 3.1 Скрін із поля ПК Microsoft Excel, де відбувається підрахунок ваги конструктивних груп стержнів моделей циліндричної оболонки, що досліджується

РОЗДІЛ 4

ВИДИ ГЕОДЕЗИЧНИХ КУПОЛІВ. ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ЦЬОГО ТИПУ КУПОЛІВ

4.1 Фулерівська геометрія

Геодезичний купол є одним із практичних застосувань геометрії Фулера, що базується на векторному розбитті простору. Основною одиницею цього поділу є **тетраедр**, чії межі розташовуються на геодезичних лініях. Геодезичними вважають найкоротші лінії, які сполучають дві точки на криволінійній поверхні). Така розбивка дозволяє досягти оптимального заповнення простору та максимально ефективно використати структурну міцність матеріалів.

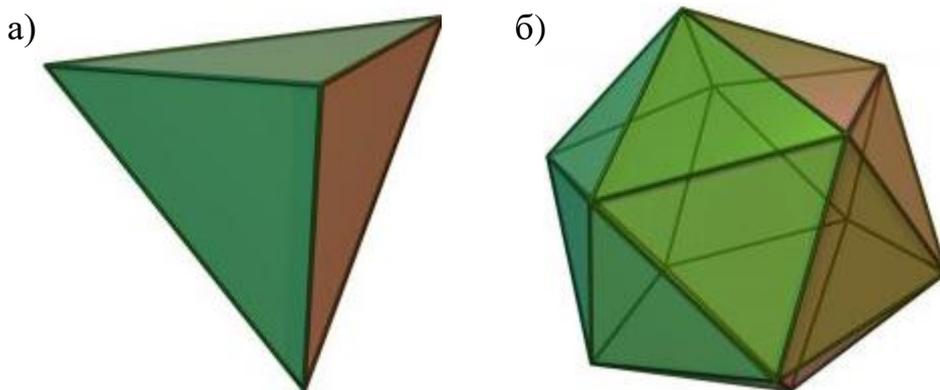


Рис. 4.1 Елементи геодезичних куполів: тетраедр (а), ікосаедр (б)

Тетраедр (чотиригранник) – це багатогранник, що складається з чотирьох трикутних граней, у кожній з вершин якого сходяться три грані. Тетраедр має 4 грані, 4 вершини та 6 ребер (рис. 4.1, а).

У практиці створення геодезичних куполів найчастіше використовують основу ікосаедра (рис. 4.1, б), оскільки ікосаедр є найбільш підходящим з усіх правильних багатогранників для триангуляції сфери методом рекурсивного розбиття. Тетраедр може бути вписаний до ікосаедру, при цьому його чотири вершини співпадатимуть з чотирма вершинами ікосаедра. Ікосаедр – це опуклий багатогранник правильної форми, який складається з двадцяти граней, кожна з яких є рівностороннім трикутником. Ікосаедр має 30 ребер і 12 вершин.

Процес триангуляції сферичного об'єму способом рекурсивного розбиття графічно можна уявити таким чином (рис. 4.2).

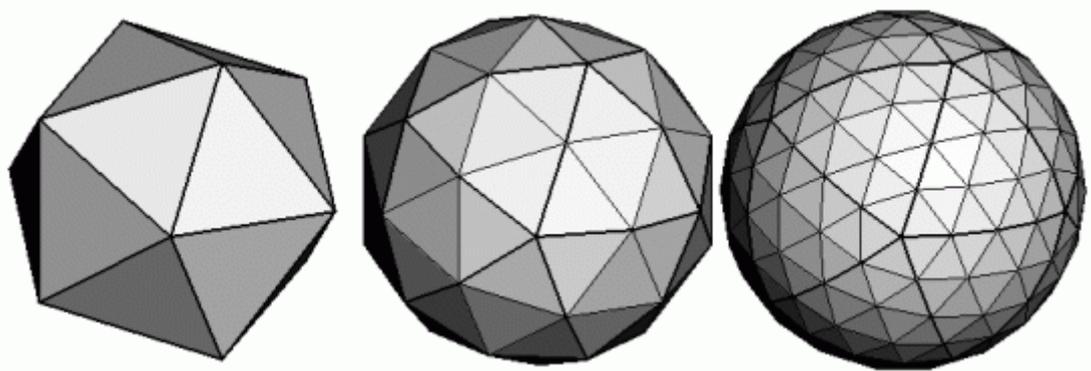


Рис. 4.2. Процес триангуляції сфери методом рекурсивного розбиття

Частота розбиття (або апроксимаційна точність) визначає, із якою точністю геодезична купольна поверхня наближається до форми ідеального купола. Теоретично можна передбачити що, чим вища частота розбивки, тим міцнішою буде конструкція. Частота розбивки маркується літерою «V».

Точність апроксимації обмежена кількістю конструктивних стержнів геодезичного купола. Тому вона має певні межі. При зведенні куполів зазвичай використовують частоту розбиття від $2V$ до $6V$, а висота купола складає $1/2$, $3/8$ або $5/8$ сфери. Непарна частота купола не може відповідати рівно половині сфери.

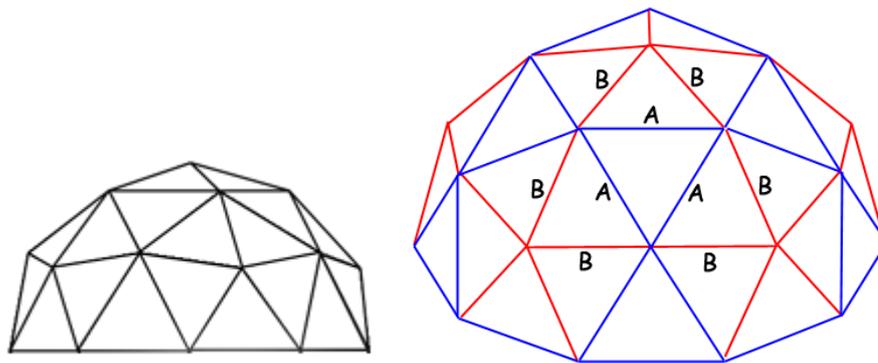


Рис. 4.3 .Геодезичний купол з частотою $2V$. Висота - $1/2$ сфери.

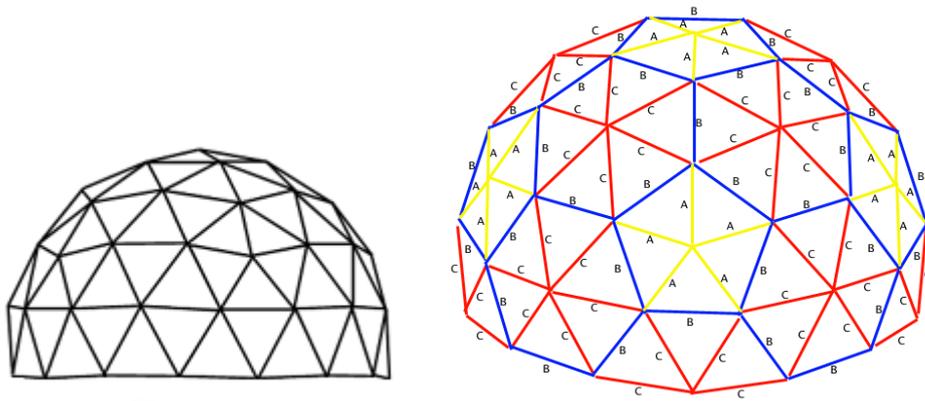


Рис. 4.4 Геодезичний купол з частотою 3V. Висота - 5/8 сфери.

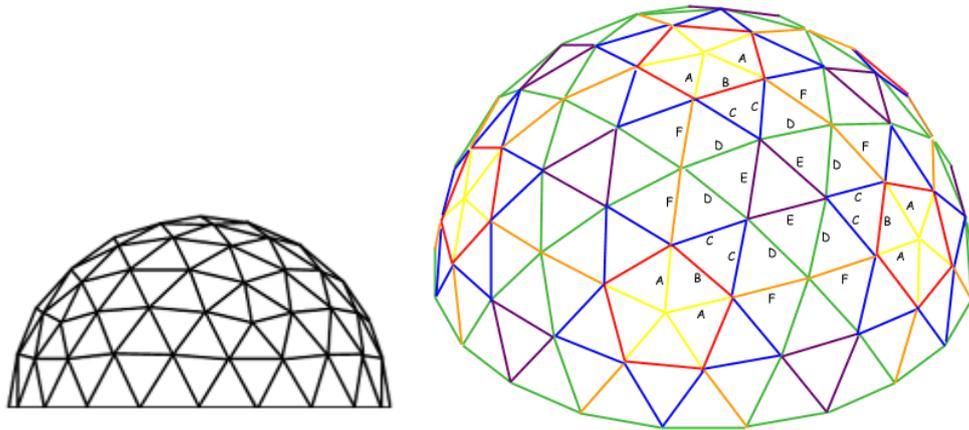


Рис. 4.5 Геодезичний купол з частотою 4V. Висота – 1/2 сфери

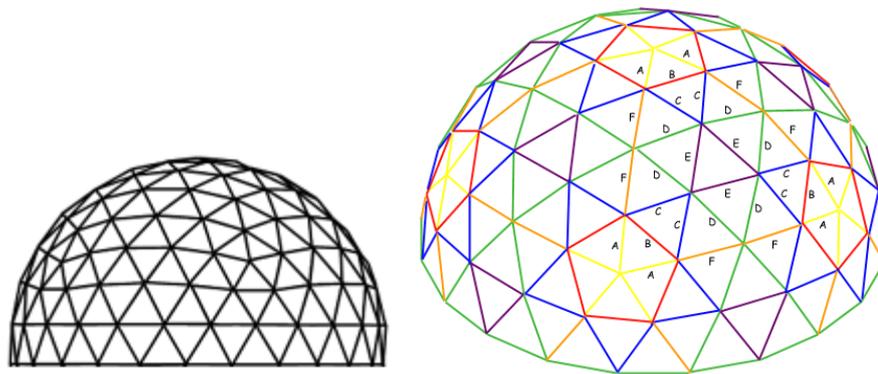


Рис. 4.6. Геодезичний купол з частотою 5V. Висота - 5/8 сфери.

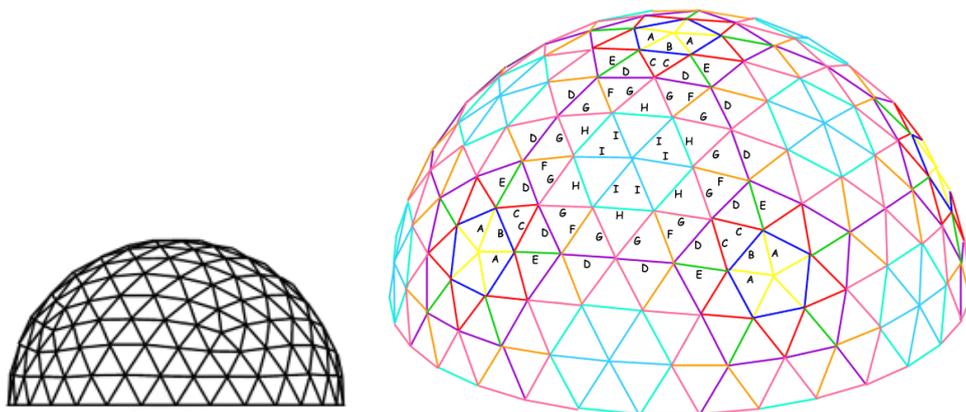


Рис. 4.7 . Геодезичний купол з частотою 6V. Висота – 1/2 сфери.

Як видно, з підвищенням частоти розбивки зростає й кількість конструктивних елементів куполу, що робить його збирання більш трудомістким:

- З частотою 3V та висоті 5/8 купол характеризується 165 ребрами та 61 конектором.
- З частотою 6V та висоті 5/8 купол характеризується 555 ребрами та 196 конекторами

З іншої сторони, для купола великого діаметру (більше ніж 14,0 метрів) складно використовувати частоту менше 3V. При такій оскільки при частоті максимальна довжина ребер наближається до 3,0 метрів, що ускладнює збирання купола з таких довгих матеріалів. За частоти 4V та діаметрі купола 14,0 м максимальна довжина ребер складає не більше 2,27 м.

4.2 Переваги й недоліки сітчастих куполів геодезичного типу

Очевидні переваги будівель та споруд, зведених на базі геодезичного куполу, зумовлені властивостями сфери:

- максимальний внутрішній об'єм за тієї ж самої корисної площі, що й у «прямокутних» будівлях;
- наявність більшої кількості повітря та світла; зниження витрат на матеріали до 30%;
- мінімальна зовнішня площа при однаковій корисній площі з «прямокутною» будівлею;
- менші втрати тепла в зимовий період й мінімальне поглинання тепла влітку, що дозволяє знизити витрати на обігрів і кондиціонування до 30%;
- геодезичний купол є досить легкою конструкцією;
- для зведення купольного будинку немає необхідності влаштовувати масивний важкий й дорогий фундамент;

- геодезичний купол може мати будь-яку площу заскління (вікон, вітражів) чи навіть мати суцільне заскління, що майже не впливає на його характеристики.

Сфера є дуже міцною конструкцією, яка не має окремого «даху», конструкції кроквяної системи чи важких перекриттів. Завдяки цьому купольні будівлі мають високу сейсмостійкість, і, навіть, при руйнуванні 35% елементів конструкції вони не обвалюються.

Унікальна міцність, яка не властива іншим типам будівель, дозволяє купольним спорудам витримувати великі снігові навантаження.

Їхня відмінна аеродинаміка забезпечує чудове обтікання вітрами. Купольні будинки продемонстрували свою стійкість під час руйнівних ураганів і смерчів на узбережжі США.

Малий купольний будинок не потребує несучих стін, а в великій будівлі стіни, що несуть, можуть бути розташовані вільно. Це надає більше можливостей для планування внутрішнього простору.

Завдяки меншій площі поверхні, менше звуків проникає в приміщення, що підвищує комфорт проживання. Симетрія сфери дозволяє оптимально розташовувати на ній сонячні батареї та колектори для максимальної ефективності.

Купольний будинок можна розмістити на ділянці будь-яким чином — він завжди залишатиметься «круглим». Купола відомі ще з давніх часів як надзвичайно міцні архітектурні форми. Особливість геодезичного куполу полягає в тому, що його несуча здатність зростає зі збільшенням розміру. При цьому міцність конструкції не залежить значною мірою від використовуваних матеріалів. Геодезичний купол за своєю суттю є конструкцією, що складається з невеликої кількості типових елементів, тому для його будівництва не потрібні висококваліфіковані працівники, а сама збірка здійснюється дуже швидко.

Ще одна особливість куполу геодезичного типу полягає в тому, що для його будівництва зазвичай не потрібна важка техніка, оскільки всі конструктивні елементи мають невелику вагу та розмір, що дозволяє їх легко монтувати ручним способом.

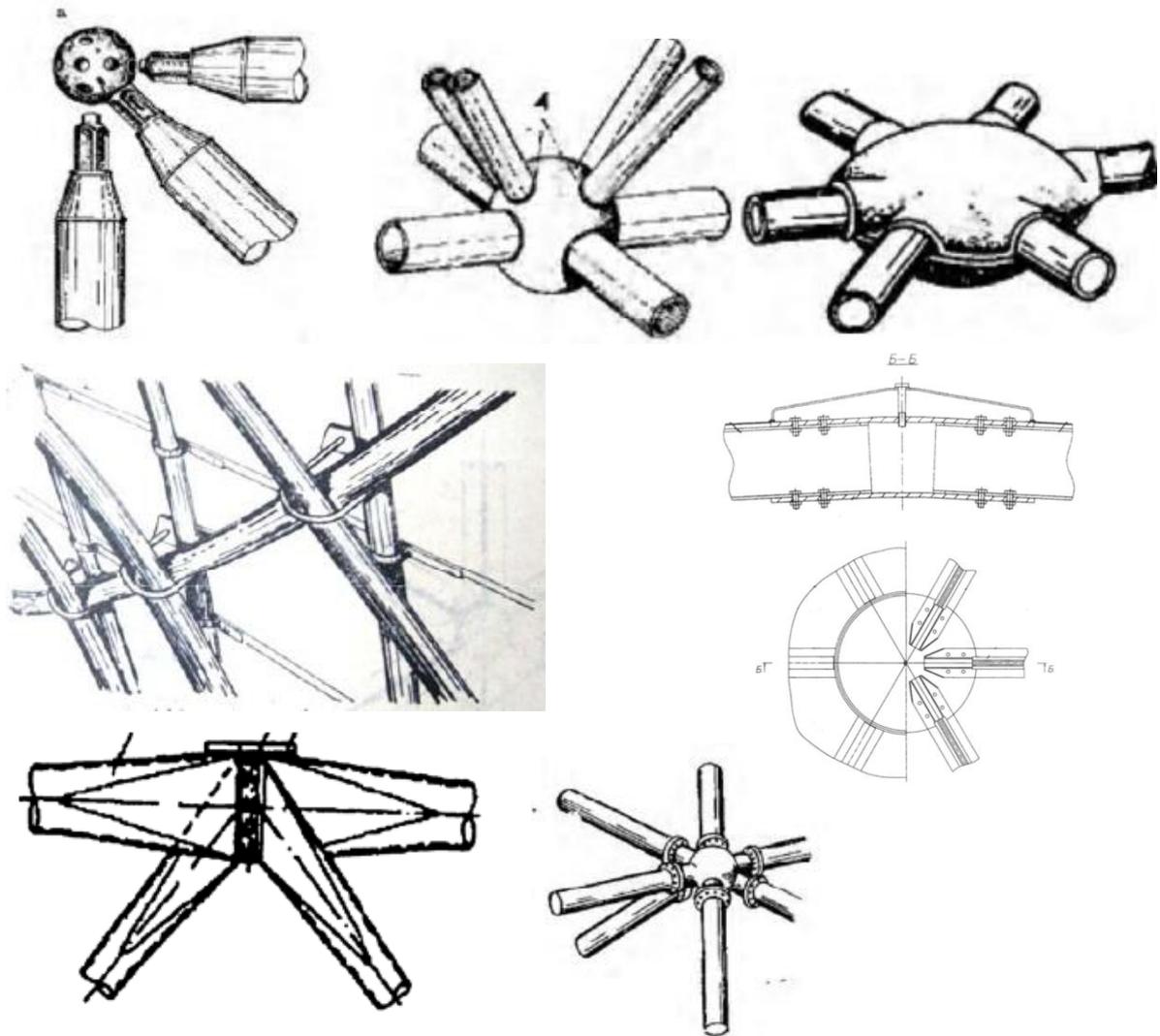


Рис.4.8 Вузлові з'єднання сітчастих куполів: «Меро» («Веймар», «МархI») –а; «Октаплатт» – (б); вузлове з'єднання «SDC» – (в); з'єднання на хомутах (г); з'єднання на конічних фасонках – (д); вузол конструкції ЦНИИСК ім. В.А. Кучеренко – (е); з'єднання на фланцях – (д)

Вузлові з'єднання «Меро» та подібні конструкції, такі як «Веймар», «Марха», й також розробки В. Новикова та В. Пічугіна (рис.4.8,а), використовують кульову вставку і збираються на болтах. Вісі стержньових елементів перетинаються у центрі кулі, що дозволяє створити чітку

розрахункову схему. Однак, основним недоліком цих з'єднань є висока трудомісткість виготовлення та велика матеріаломісткість.

Вузлове з'єднання типу «Октаплатт» та подібні конструкції, розроблені Б. Цетліним, А. Губіним, Є. Кондраховим (рис. 4.8,б), виконуються з використанням порожнистих куль, складених із двох півсфер та проміжного диска. До поверхні кулі приварюють патрубки. На патрубки потім встановлюються труби. Основними недоліками цих вузлів є необхідність високої точності виготовлення, значний обсяг робіт із зварювання й необхідність встановлення лісів.

З'єднання вузлів типу «SDC» (рис. 4.8, в) складається із двох литих деталей, що мають патрубки, які зварюються після вставлення до них труб. Одне з найпростіших з'єднань стрижневих елементів — на хомути (рис. 4.8, г) — використовувалося в Чехословаччині для куполів системи Ледерера. В ЦНДПБК ім. Н.П. Мельникова було розроблено й зазнали широкого поширення вузлові з'єднання на фасонках конічного типу (рис. 4.8, д). Стрижні з двотавровим перетином, обрізані по кінцях, сполучають із фасонками за допомогою високоміцних болтів. Така конструкція забезпечує швидкий й уніфікований монтаж елементів купола, що переважно здійснюється методом підрощування.

Вузол розробки ЦНДПБК ім. В.А. Кучеренко (рис. 4.8, е) передбачає сплющення кінців усіх прилеглих стрижнів, які зварюються між собою за допомогою ванного зварювання без використання перехідних елементів. З'єднання вузлів за допомогою фланців з литими фасонками (рис. 4.8, ж) дозволяє всім стрижнів перетинатися в центрі кулі. Таке з'єднання має високу жорсткість, але потребує значних витрат матеріалів.

РОЗДІЛ 5

МОДЕЛЮВАННЯ СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНИХ СХЕМ ПРИ ВИКОНАННІ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

5.1 Алгоритм виконання дослідження із використанням методу скінчених елементів

На рис.5.1 наведено блок-схему, що описує виконання числового дослідження.

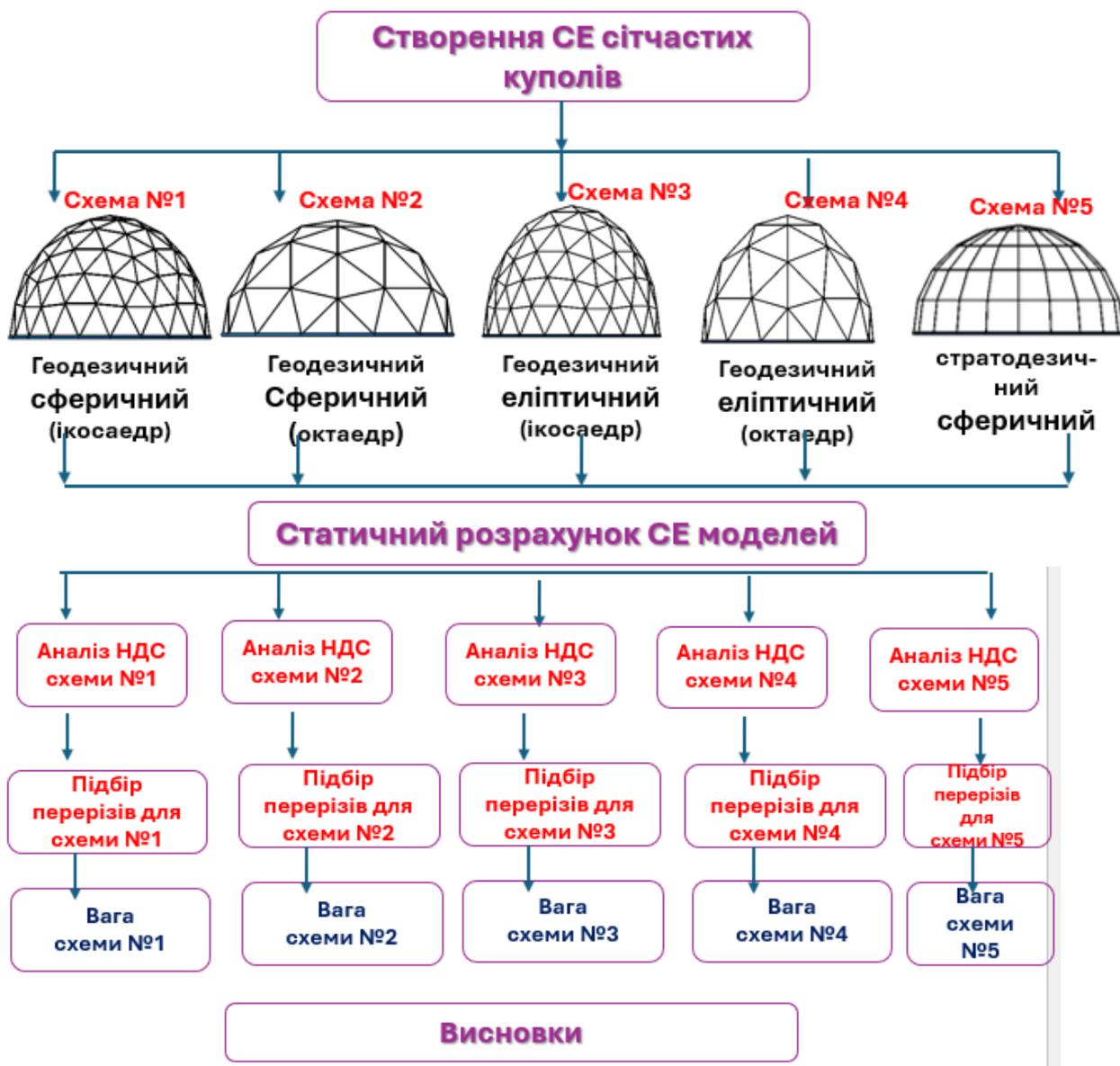


Рис.5.1 Алгоритм виконання числового експерименту

5.2 Моделювання розрахункових схем сітчастих куполів

Враховуючи вищеописані особливості утворення форми геодезичних куполів (рис. 4.3–4.7), розробимо куполи з різною частотою розбивки, але з однаковими іншими параметрами. Це означає, що висота конструкції $h = 14,4$ м і її проліт (чи діаметр) $D = 20,0$ м будуть однаковими для всіх варіантів (рис. 5.2).

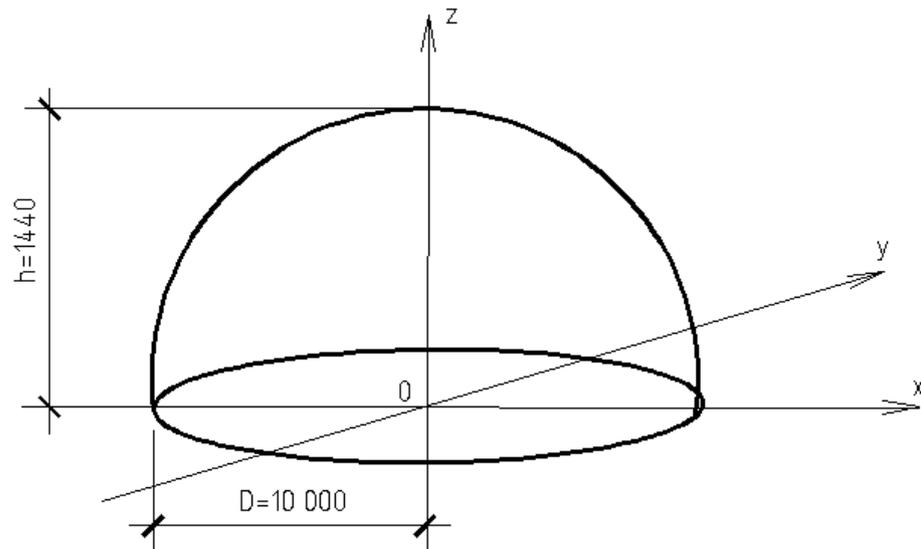
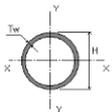
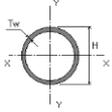


Рис. 5.2 Єдина геометрична схема для різних типів розрахункових кінцевоелементних схем

5.2.1 Характеристики жорсткості та граничні умови

Для елементів сітчастого куполу прийнято скінчений елемент № 10. Це універсальний просторовий стержень, що має шість можливих ступенів свободи в вузлах [8]. Приймемо трубчатий профіль для усіх елементів моделей сітчастого куполу (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1- Характеристики вихідних жорсткості для стержнів куполу

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м ²	R, т/м ³	μ	Сталь С235	q, т/м
1. Стержень сферичної поверхні 	Труба ТБ 159 х4.5 (ДСТУ 8938:2019)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.0108158
2. Стержень опірною кільця 	Труба ТБ 325х6 (ДСТУ 8938:2019)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.0471829

Конструкція куполів шарнірно приєднується до фундаменту. З'єднання стержнів поля куполу прийнято шарнірним, болтовим.

5.2.2 Навантаження на конструкцію

Основними навантаженнями, що діють на оболонку, є власна вага стержньової оболонки, вага конструкції покрівлі та снігове навантаження. Як зазначено в дослідженнях [15], вплив вітрових навантажень можна ігнорувати, оскільки зусилля від вітрового впливу складають лише близько 1%. Тому цей вплив не є суттєвим для напружено-деформованого стану всієї оболонки. Оскільки будівля розташована в Чернігові, за нормами [1] характеристичне значення снігового навантаження становить $0,176 \text{ т/м}^2$.

У розрахунку передбачено прийнято три види завантаження (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 - Завантаження, що прийнято до розрахунку

№ завантаження	Характеристика
№ 1	- Тип - постійне, власна вага плити, що задавалася автоматично ПК Ліра-САПР й зазнавала змін на кожній ітерації підбору перетинів груп конструктивних елементів
№ 2	Тип - постійне та являє собою власну вага конструктивних шарів покрівлі
№ 3	Тип – тимчасове, снігове для м. Суми

В таблиці 5.3 наведено збірн навантажень на 1м² поверхні куполу.

Таблиця 5.3 - Збір навантажень на 1м² покриття

Назва	Характеристичне значення навантаження, (кН/м ²)	Коеф. надійності за навантаженням γ_f	Розрахункове навантаження кН/м ²
I. Постійні навантаження			
Власна вага конструкції (згідно призначених жорсткостей)	Автоматично визначається в ПК «Ліра-САПР»		
Профнастил верхній Т40 0,7	0.064	1.05	0,067
Утеплювач рулонний 150мм (середня щільність 30 кг/м ³)	0.045	1.2	0,054
Плівка	0.015	1.2	0,018
Нижній профнастил Т57 0,7	0.068	1.05	0,07
ВСЬОГО ПОСТІЙНЕ:	0,192		0,0828
II. Тимчасове навантаження			
Снігове навантаження (за ДБН В.1.2-2:2006, додаток Е) для м. Суми (1760 Па=1,76 кН/м ²)	1,76	1.14	1,87
Повне навантаження	2,024		2,16

На рис. 5.3 приведено зображення діалогового вікна для призначення навантажень на сітчасту купольну оболонку.

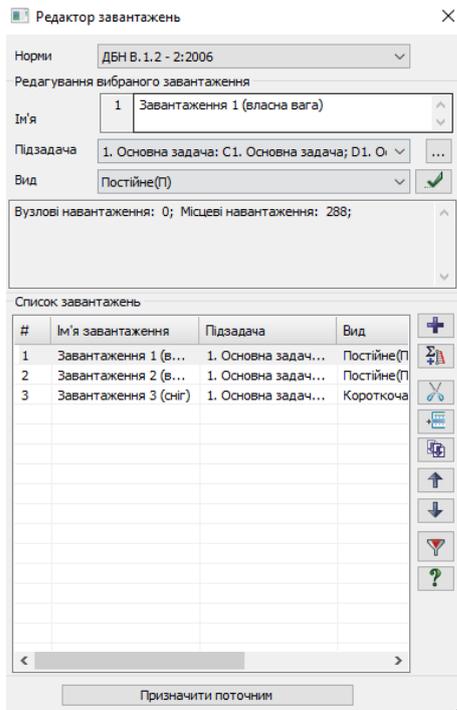


Рис. 5.3 Вікно призначення навантажень на сітчасту оболонку

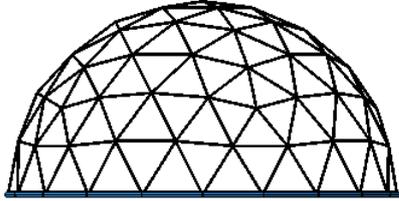
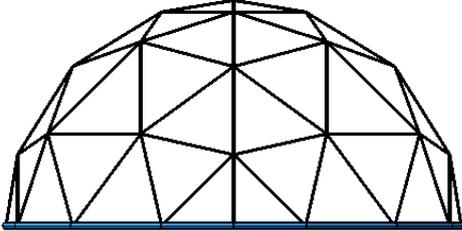
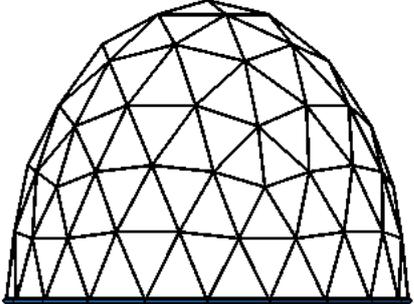
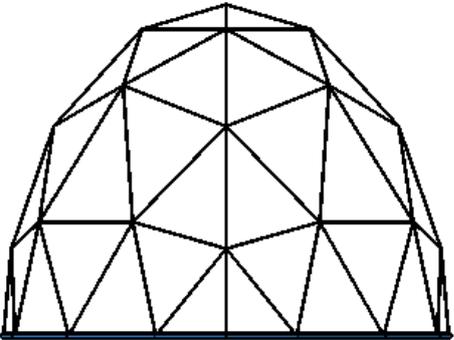
Навантаження у Завантаженнях №2 та 3 від рівномірно розподіленого навантаження приведені до вузлових навантажень згідно вантажній площі для вузлів криволінійної поверхні.

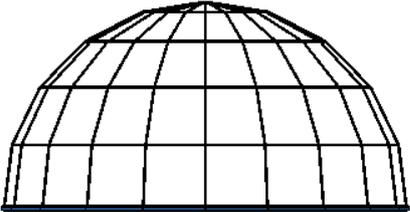
5.2.3 Типологія скінченоелементних розрахункових схем

Оскільки геометрія поверхні визначає її здатність витримувати навантаження, критеріями для моделювання куполів будуть, окрім частоти розбивки, також вид плоскої кривої, яка є твірною для куполу. Для елементів каркаса криволінійної поверхні використано скінчений елемент СЕ 10, що має 6 ступенів свободи в вузлах [8].

Характеристики прийнятих розрахункових схем наведено в таблиці 2.

Таблиця 5.4 Характеристики кінцвоелементних розрахункових схем

№ схеми	Тип твірної/ назва куполу	Частота розбивки поверхні	Вигляд куполу/назва
1.	Дуга кола/сферичний	ікосаедр	 <p data-bbox="1137 651 1342 685">геодезичний</p>
2.	Дуга кола/сферичний	октаедр	 <p data-bbox="1137 1005 1342 1039">геодезичний</p>
3.	Дуга еліпсу/еліптичний	ікосаедр	 <p data-bbox="1137 1417 1342 1451">геодезичний</p>
4.	Дуга еліпсу/еліптичний	октаедр	 <p data-bbox="1137 1874 1342 1908">геодезичний</p>

5	Дуга кола/сферичний	-	 <p data-bbox="1109 414 1364 459">стратодезичний</p>
---	------------------------	---	---

Кінцевоелементні схеми куполів за табл.5.4 наведено на рис.5.4.

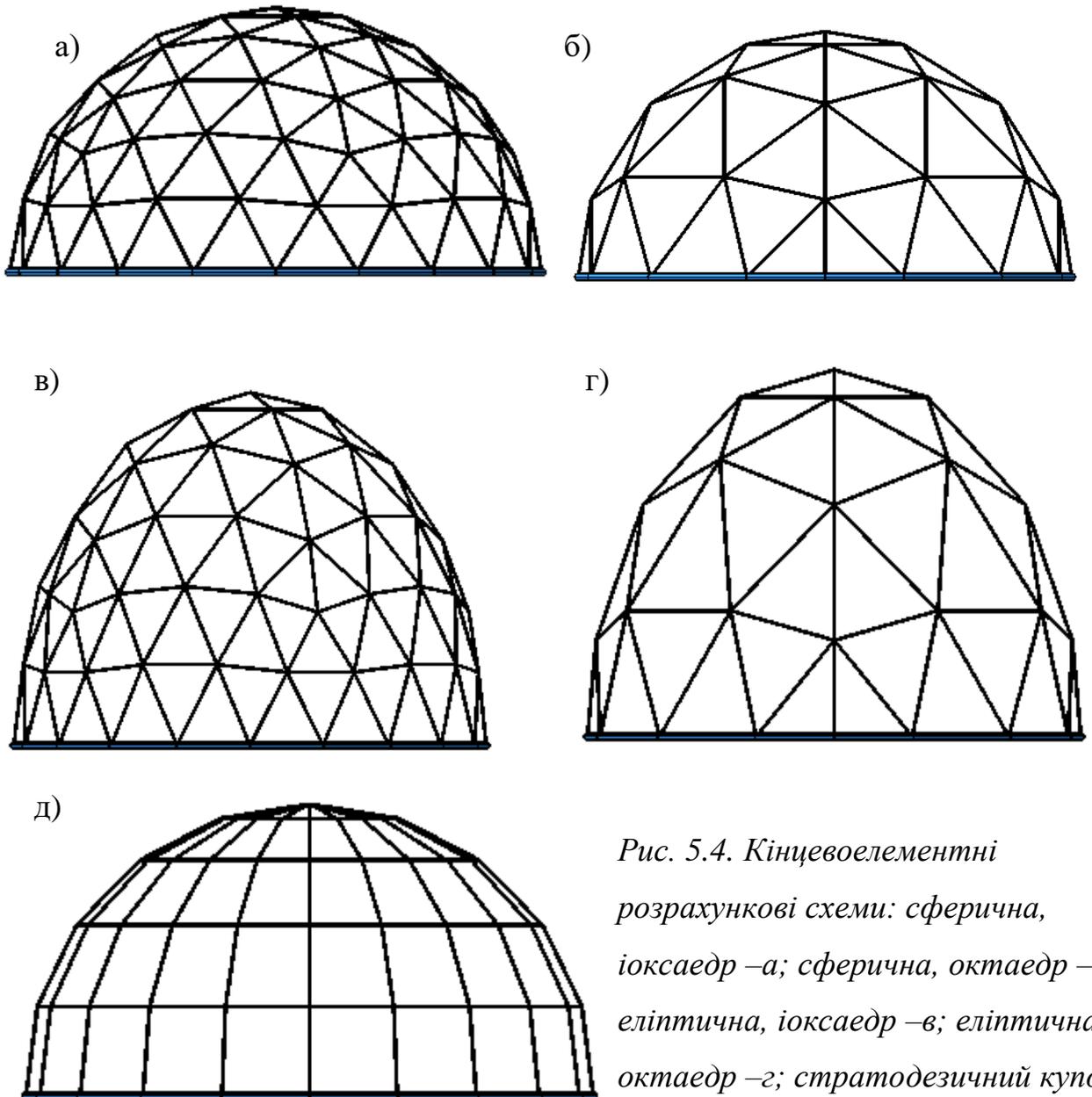


Рис. 5.4. Кінцевоелементні розрахункові схеми: сферична, ікосаедр –а; сферична, октаедр –б; еліптична, ікосаедр –в; еліптична, октаедр –г; стратодезичний купол–

РОЗДІЛ 6

РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ МОДЕЛЕЙ

6.1 Аналіз деформативності моделей

Після виконання статичного розрахунку скінченоелементних моделей сітчастих куполів отримали результати щодо зусиль в стержньових елементах, переміщень вузлів по вертикалі вузлів скінченоелементних схем, а також коефіцієнти запасу стійкості моделей. В таблиці 6.1 наведено дані щодо максимальних вереміщень по осі Z від розрахунових сполучень завантажень, що прийняті.

Таблиця 6.1 - Максимальні вертикальні переміщення вузлів моделей куполу від РСН 2

№ схеми куполу	Переміщення, fz [мм]		
	РСН1	РСН2	РСН3
Схема № 1	-0,73	-10,9	-9,89
Схема № 2	-1,44	-29,5	-26,7
Схема № 3	-0,593	-10,4	-9,46
Схема № 4	-1,14	-23,8	-21,6
Схема № 5	-1,01	-19,8	-18

На рис.6.1 наведено графічне зображення даних із таблиці 6.1. максимальне переміщення по вертикалі вузлів моделей від 2-го розрахункового сполучення навантажень.

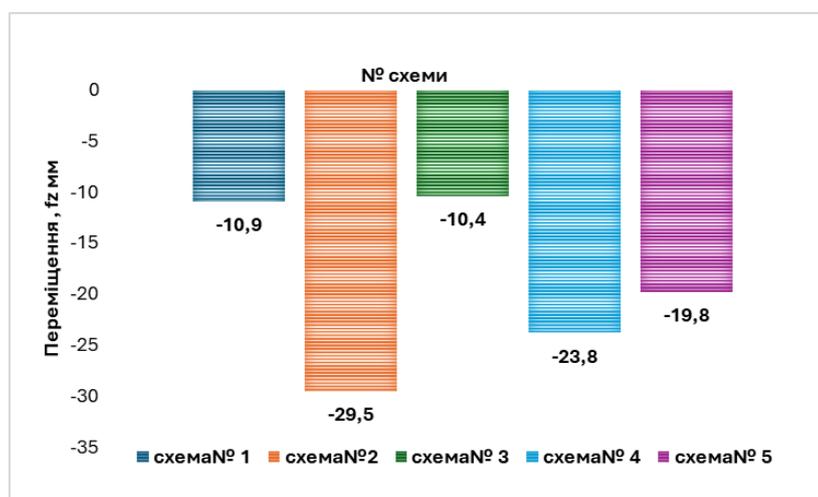
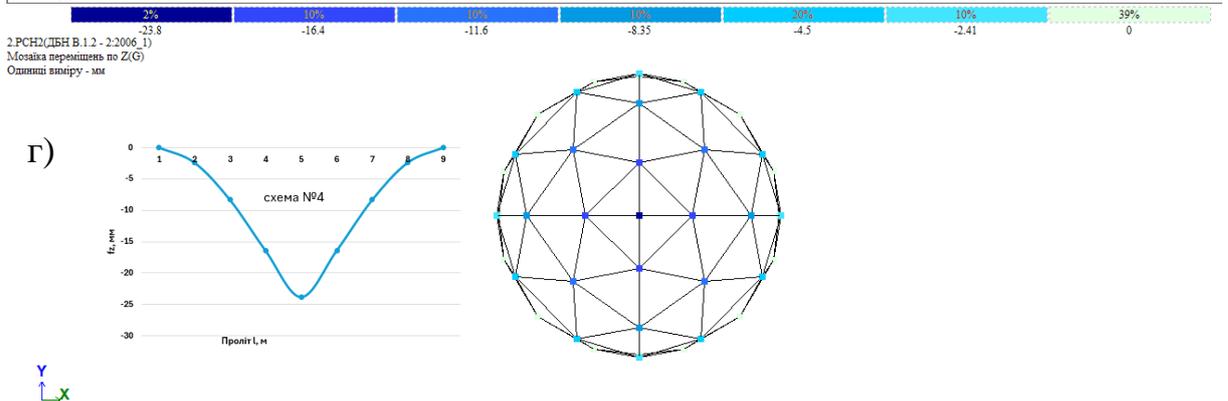
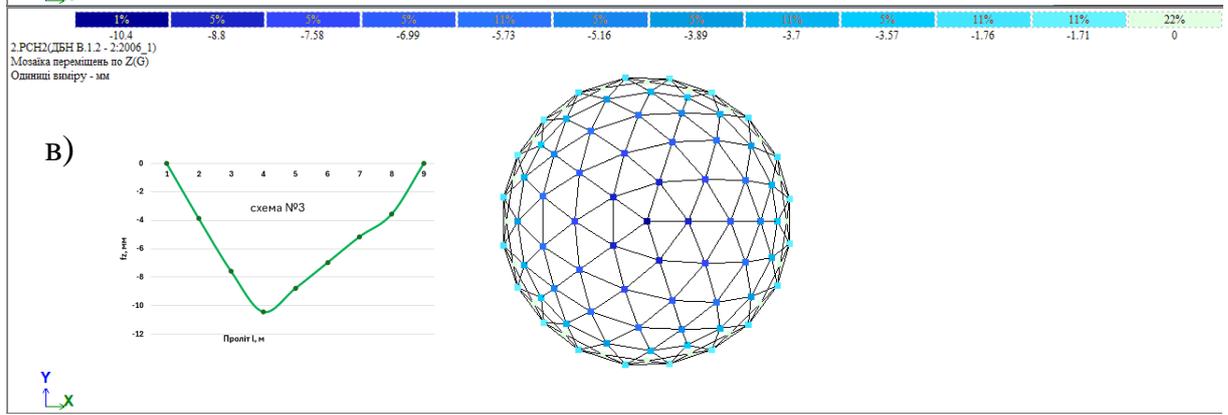
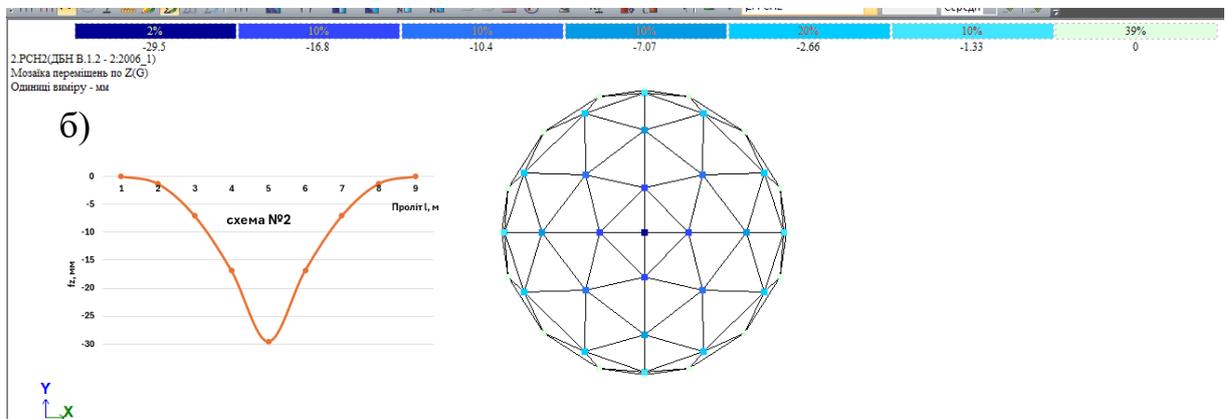
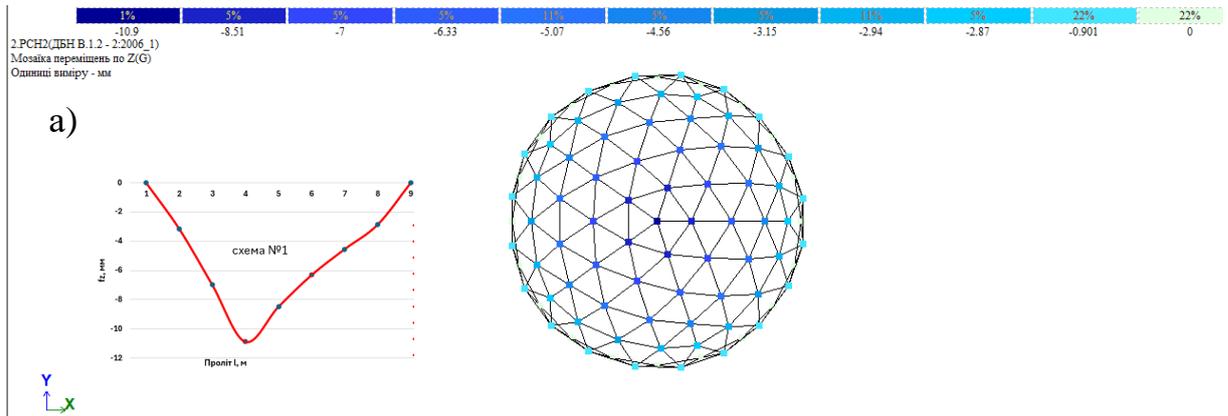


Рис.6.1 Максимальні вертикальні переміщення вузлів системи від РСН2

На рис.6.2 наведено мозаїки переміщень вузлів розрахункових моделей вздовж осі Z від 2-го розрахункового сполучення навантажень.



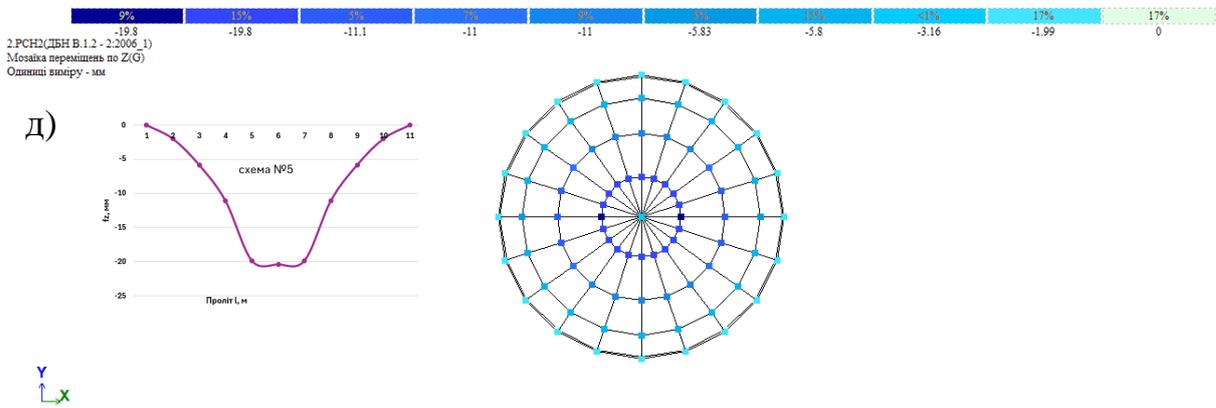


Рис. 6.2 Мозаїка вертикальних переміщень вузлів оболонок від RCH2: для схеми №1-а; для схеми №2-б; для схеми №3-в; для схеми №4 - г; для схеми №5-д

На рис. 6.3 наведено графік вертикальних переміщень вузлів в поперечному перерізі моделей сітчастих купольних оболонок, що досліджуються.

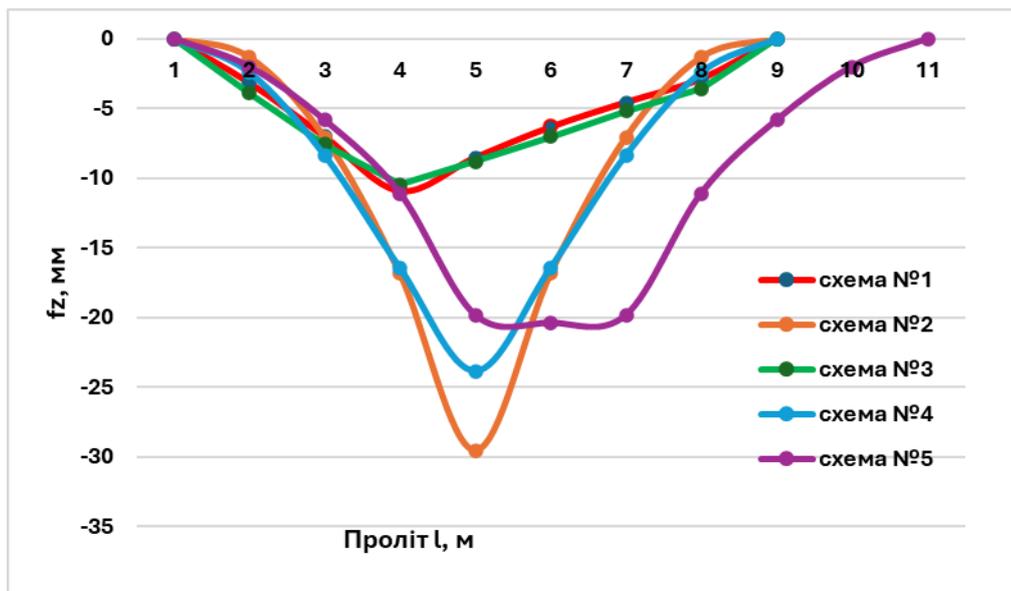


Рис.6.3 Графік вертикальних переміщень вузлів в поперечному перерізі моделей сітчастих купольних оболонок

Так, як видно із рис. 6.3 кожній поверхні, зважаючи на тип твірної – сферична чи еліптична, притаманна своя форма деформацій. Для стртодезичного куполу ця крива прогинів є відмінною від кривої, що притаманна куполам геодезичного типу. Найбільш деформуємою моделлю є геодезичний купол за схемою №2.

На рис.6.4 наведено форми деформування під навантаженням для моделей куполів.

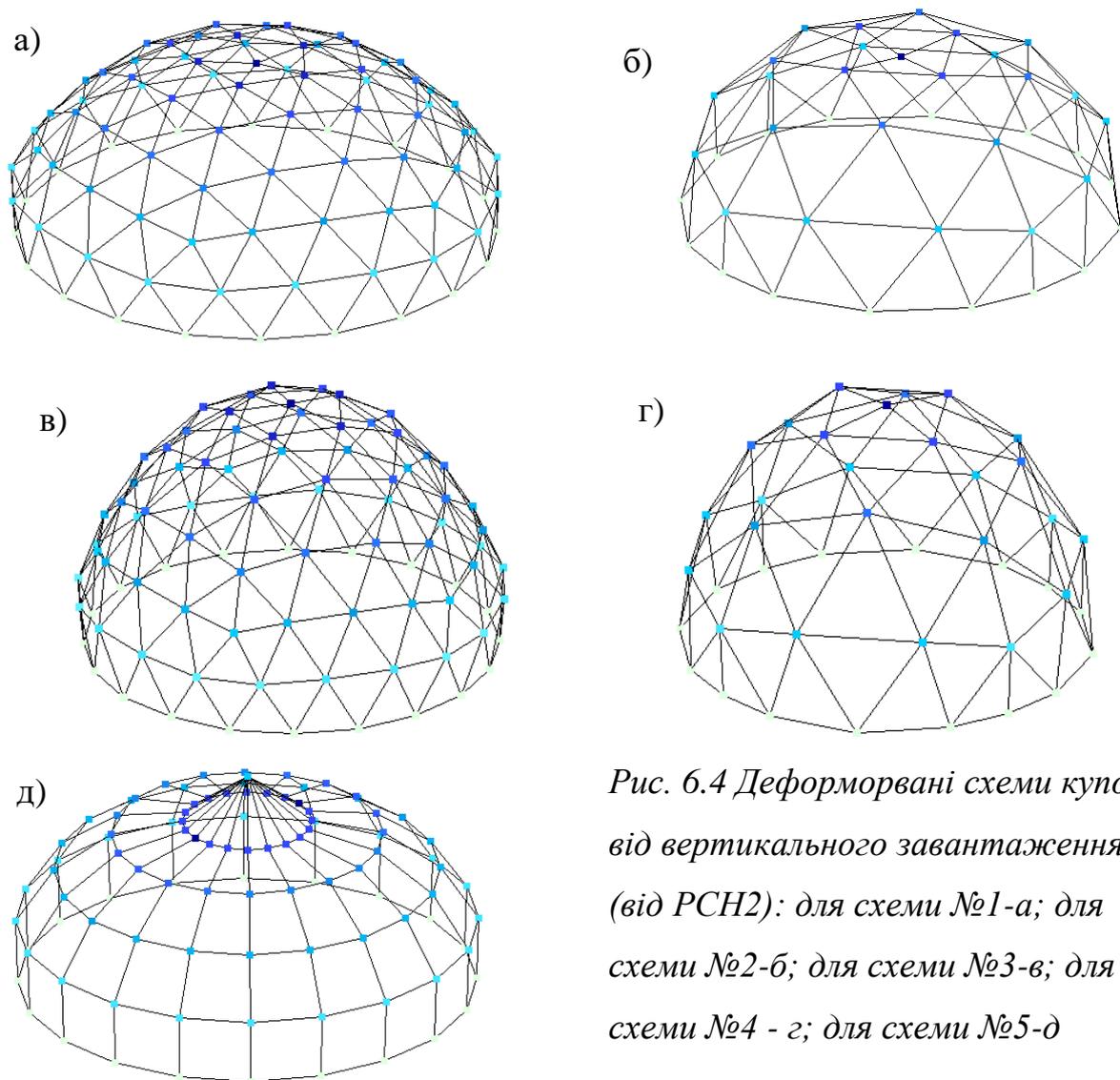


Рис. 6.4 Деформовані схеми куполів від вертикального завантаження (від РСН2): для схеми №1-а; для схеми №2-б; для схеми №3-в; для схеми №4 - г; для схеми №5-д

Із табл. 6.1 видно, що максимальне вертикальне переміщення вузлів максимальний (вертикальний прогин) має найменше значення для моделі №3-10,4 мм. Мінімальними прогином також характеризується й модель №1, для якої максимальний прогин становить 10,9 мм. З точки зору деформативності конструкцій, що досліджуються, найбільш жорсткими є моделі №1 та №3. Усі максимальні прогини для усіх розрахункових схем знаходяться в допустимих межах. Максимальний граничний прогин за [3] для моделей оболонки становить 80 мм:

$$f_u = \frac{L}{250} = \frac{2000}{250} = 8 \text{ см}$$

Тому всі моделі є достатньо жорсткими. Але для моделі №2 максимальний вертикальний прогин є майже в 3 рази більшим, ніж для моделей №1 та №3 й для моделей №4,5 є в 2 рази більшим, ніж для моделей №1 та №3.

6.2 Аналіз стійкості моделей

Розрахунок оболонок на стійкість є одним з ключових розрахунків при їх проектуванні. Відомо, що оболонки характеризуються високою міцністю, але їх недостатня стійкість може стати критерієм, який обмежує їх несучу здатність. За завданні в параметрах статичного розрахунку опції «Стійкість», були визначені коефіцієнти запасу стійкості для кожної розрахункової моделі куполу. Під час розрахунку за граничним навантаженням (розрахунок на стійкість) застосовується *коефіцієнт запасу стійкості*, який показує, в скільки разів можна збільшитися навантаження, перш ніж система втратить стійкість.

$$n = \frac{P_{cr}}{P}, \text{ де}$$

де P – розрахункове навантаження;

P_{cr} – навантаження, що відповідає втраті стійкості чи появі можливості існування нових форм рівноваги системи.

Запас стійкості визначає величину впливу, який може порушити систему, але при цьому вона повернеться до початкового стану рівноваги. Наприклад, при ударі по колоні (стовпу) вона може захитатися, але залишиться стояти.

Коефіцієнти стійкості для різних типів сітчастих геодезичних куполів наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2- Коефіцієнти запасу стійкості n

Схема № 1	Схема № 2	Схема № 3	Схема № 4	Схема № 5
11,26	2,6	5,52	1,52	0,73

На рис.6.5 наведено графічен зображення даних з таблиці 6.2.

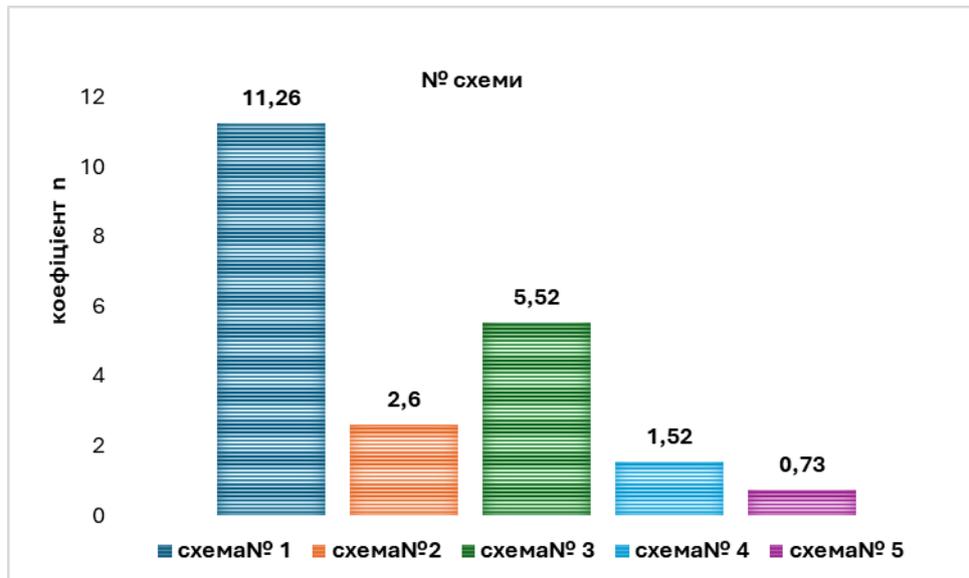
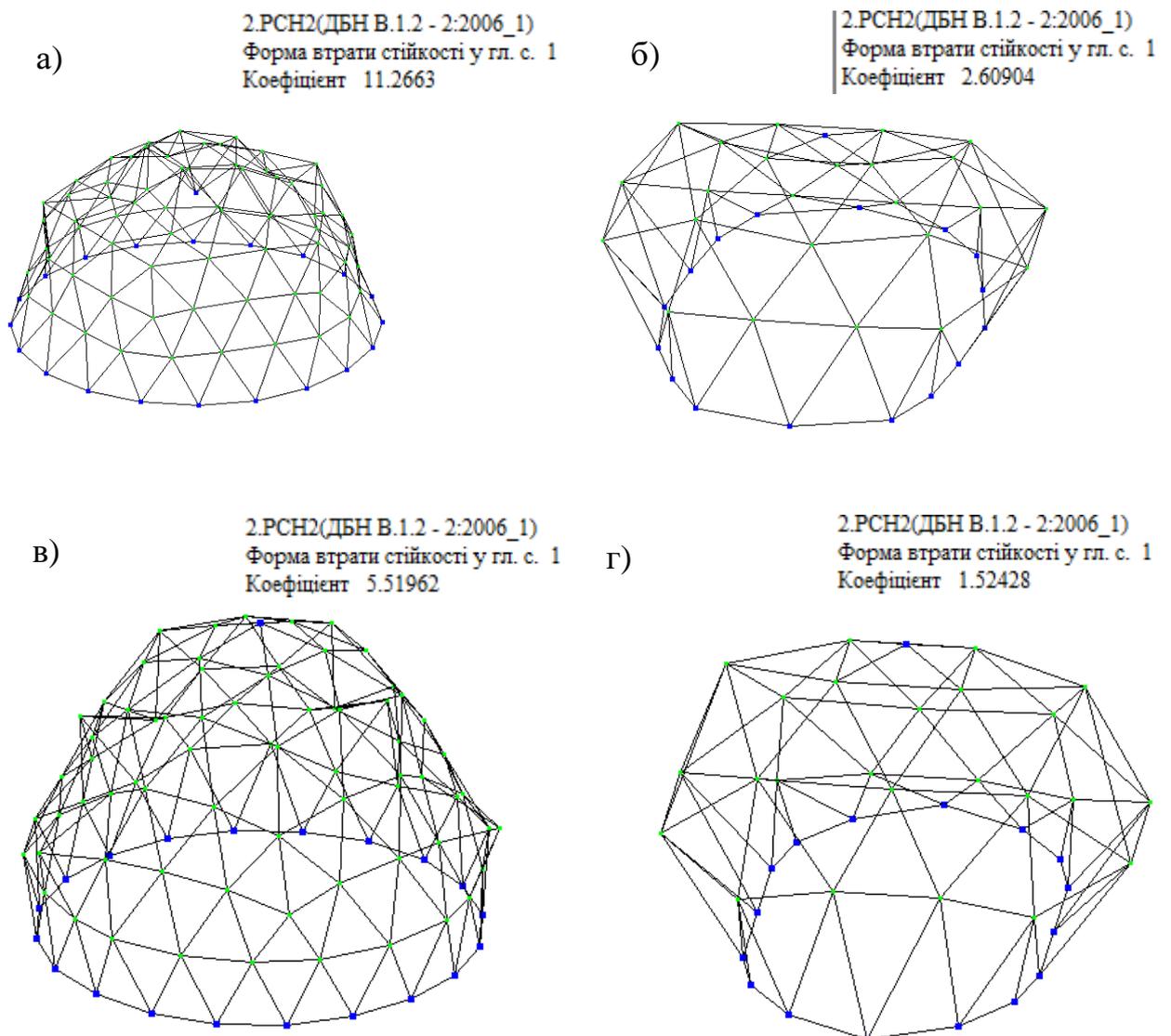


Рис.6.5 Коефіцієнти запасу стійкості для моделей, що розглядаються

На рис. 6.6 наведено форми втрати стійкості сітчастих моделей куполів, які досліджуються.



д)

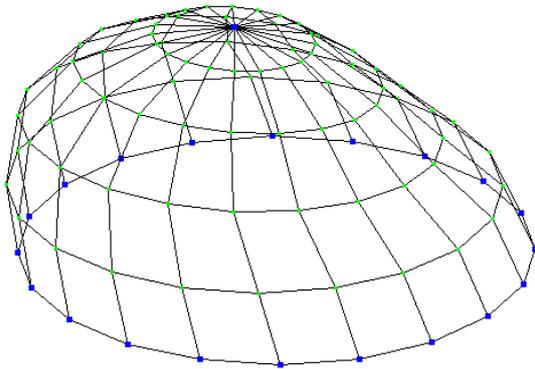


Рис.6.6 Форми втрати стійкості від РСН2 для моделей, що досліджуються: для схеми №1-а ($n_1=11,26$); для схеми №2-б ($n_2=2,6$); для схеми №3-в ($n_3=5,52$); для схеми №4($n_4=1,52$) - г; для схеми №5-д ($n_5=0,72$)

З рис.6.6 та табл. 6.2 видно що конструкції мають різний запас стійкості. Так, модель №5 - стратодезичний купол має коефіцієнт запасу стійкості $n=0,72 < 1$, тому така система є нестікою. Отже, конструкція може втратити первісне положення рівноваги під навантаженням не від руйнування матеріалу стержнів, а від втрати стійкості положення.

Також еліптичний купол, побудований на основі ікосаедра, є стійкішим за еліптичний купол, побудований на основі октаедра. Зі збільшенням частоти розбиття поверхні куполу конструкція стає більш стійкою.

Мінімальний запас стійкості має модель №4 ($n_4=1,52$). Достатній запас стійкості мають моделі №2 ($n_2=2,6$), №3 ($n_2=5,52$) та схема №1 ($n_1=11,26$). Найбільший більш ніж десятикратний запас міцності має модель №1-геодезичний сферичний купол, побудований на основі ікосаедра.

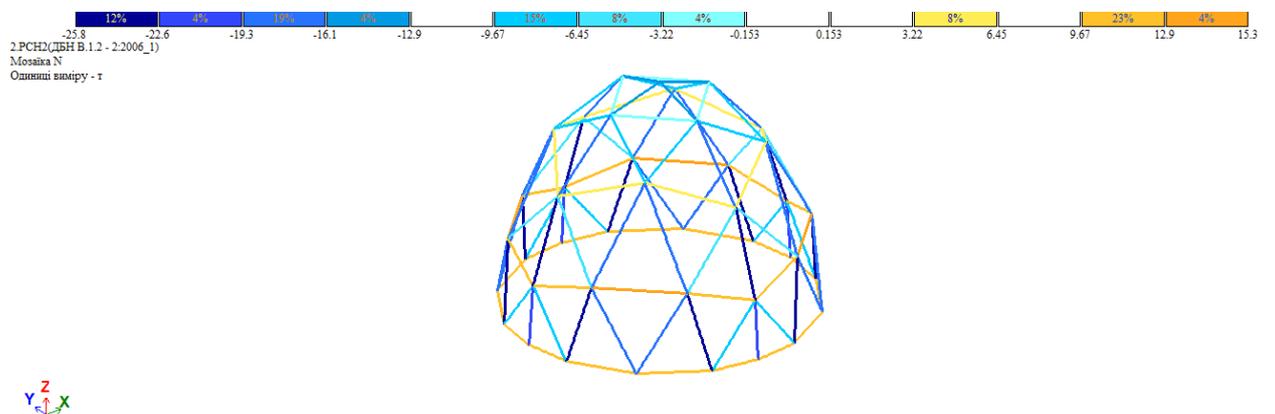
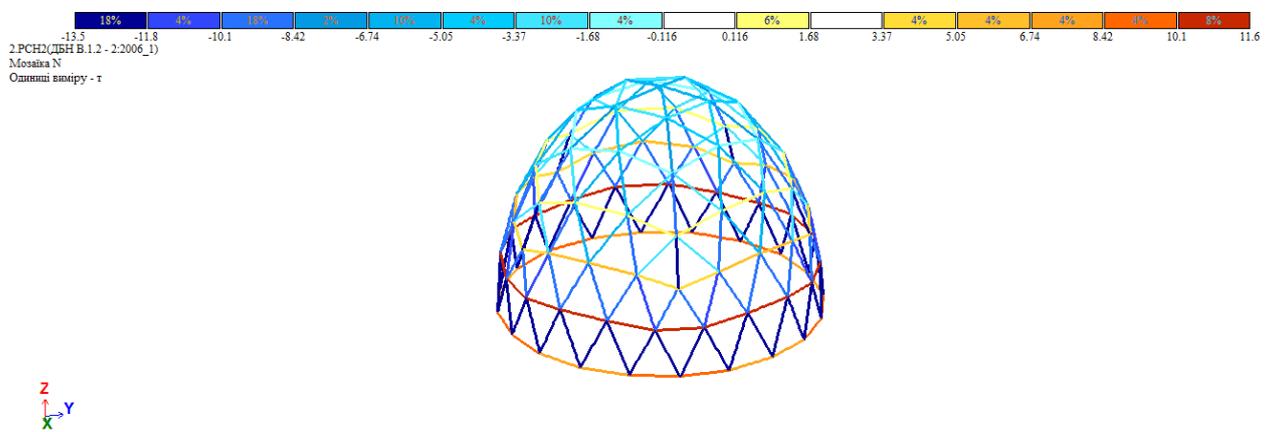
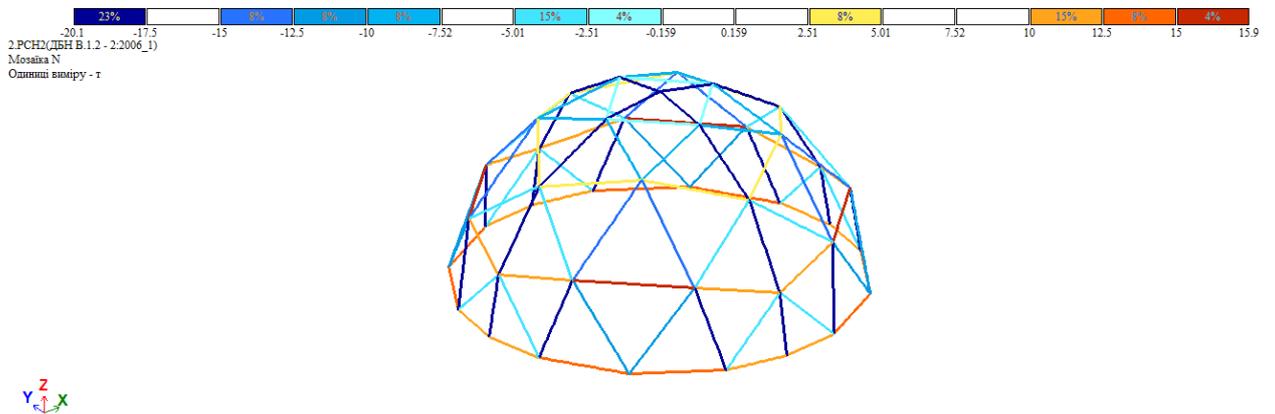
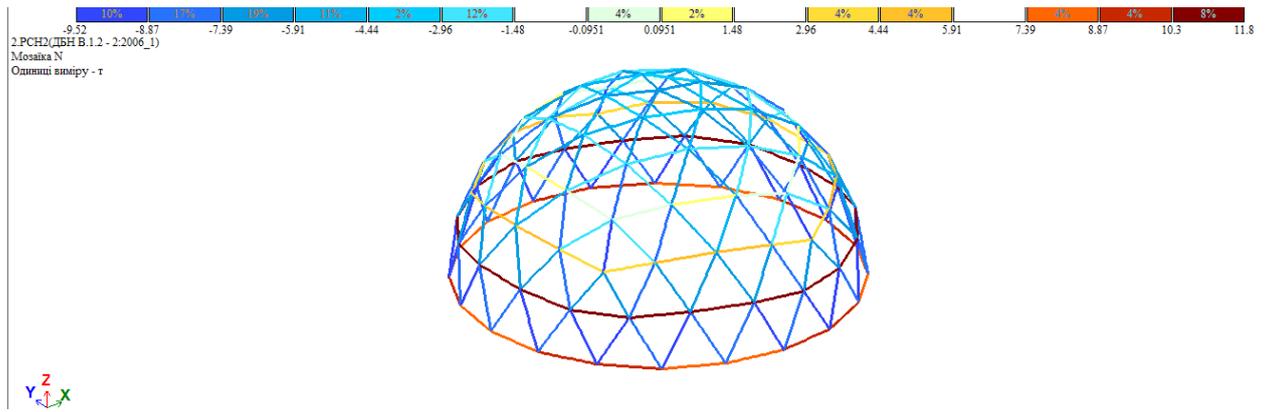
6.3 Аналіз напруженого стану моделей

Важливим є розрахунок купольної сітчастої оболонки покриття щодо:

- загальної стійкості під впливом навантажень;
- визначення деформацій у вертикальній площині;
- визначення поздовжніх зусиль стиску (або розтягу), що виникають у стержнях.

Саме за цими критеріями буде здійснюватися оцінка ефективності статичної роботи кожної окремої оболонки.

На рис. 6.7 наведено мозаїку осьових зусиль розтягу (стиску) в стержнях поля сітчастої оболонки для моделей, що досліджуються.



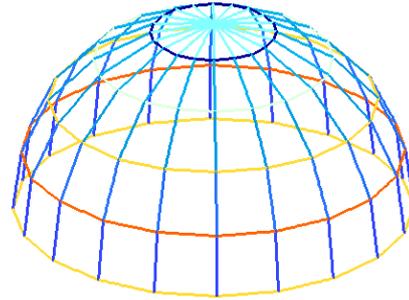
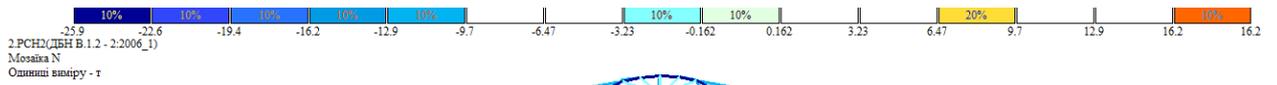


Рис. 6.7 Мозаїку осьових зусиль N розтягу (стиску) в стержнях поля сітчастої оболонки для моделей, що досліджуються: для схеми №1-а (; для схеми №2-б; для схеми №3-в; для схеми №4- г; для схеми №5-д

На рис.6.8 – 6.9 приведено діаграми максимальних осьових сил N , що виникають в стержнях сітчастих куполів.

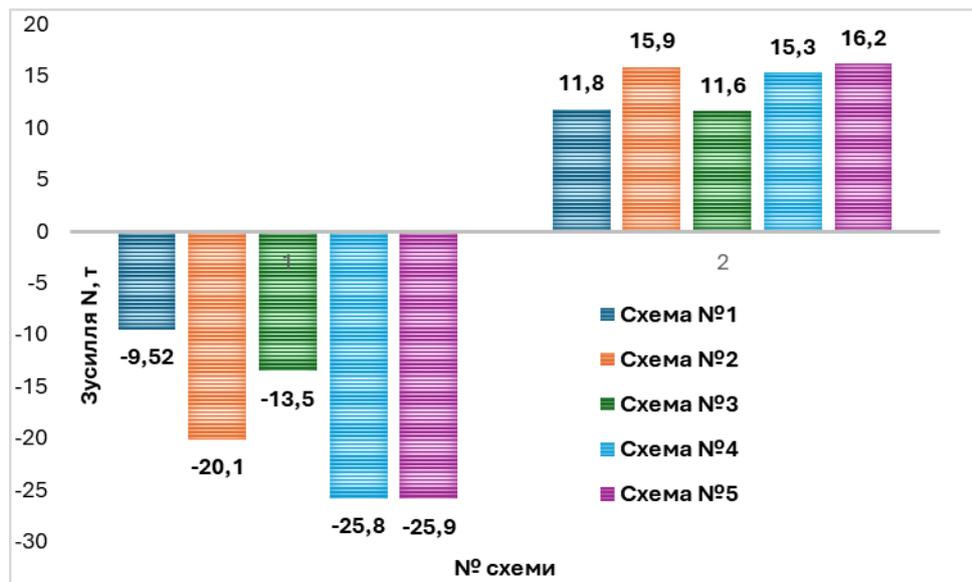


Рис.6.8 Діаграми максимальних осьових сил N , що діють в стержнях криволінійної поверхні купольних моделей, що досліджуються, від РСН2

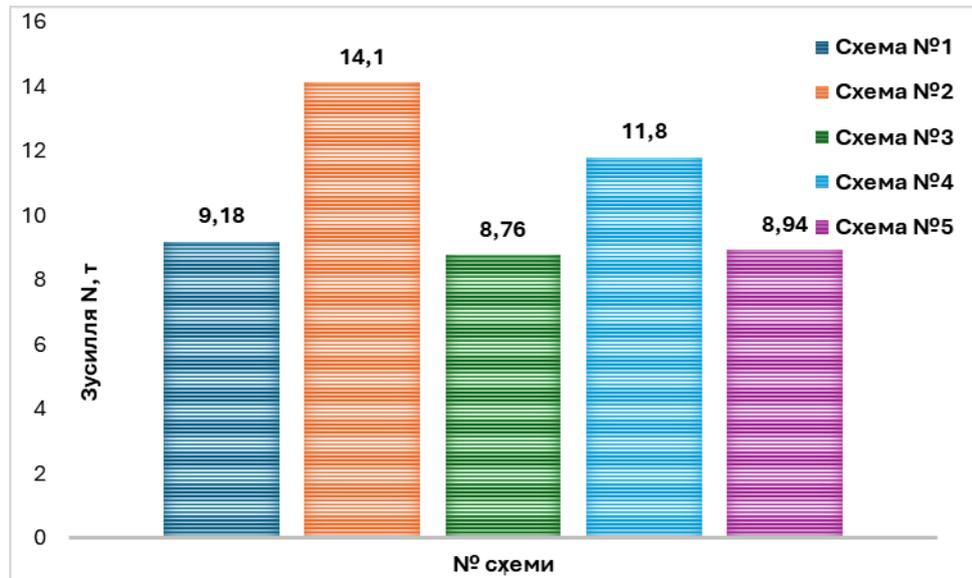


Рис.6.9 Діаграми максимальних осьових сил N , що діють опірному кільці купольних моделей, що досліджуються, від РСН2

Стержні куполів зазнають знакоперемінних значень осьових зусиль N . Так, частина стержнів працює на стиск, а частина – на розтяг.

Так, очевидно із рис.6.8, що найбільш ефективною моделлю з точки зору статичної роботи – розподілу зусиль в стержнях поверхні є модель купольної оболонки за схемою №1. Так, в ній виникають найменші за модулем як зусилля розтягу, так і зусилля стиску. Найбільш напруженими є моделі №3 та №4, оскільки в них виникають найбільші осьові зусилля розтягу.

На рис.6.10 та рис.6.11 приведено епюри зусилля N в окремих стержневих елементах, розглянутих в поперечному перерізі схеми для моделі №1 від РСН2. На рис. 6.12 наведена загальна епюра розподілу осьових зусиль в стержнях криволінійної поверхні моделі №1.

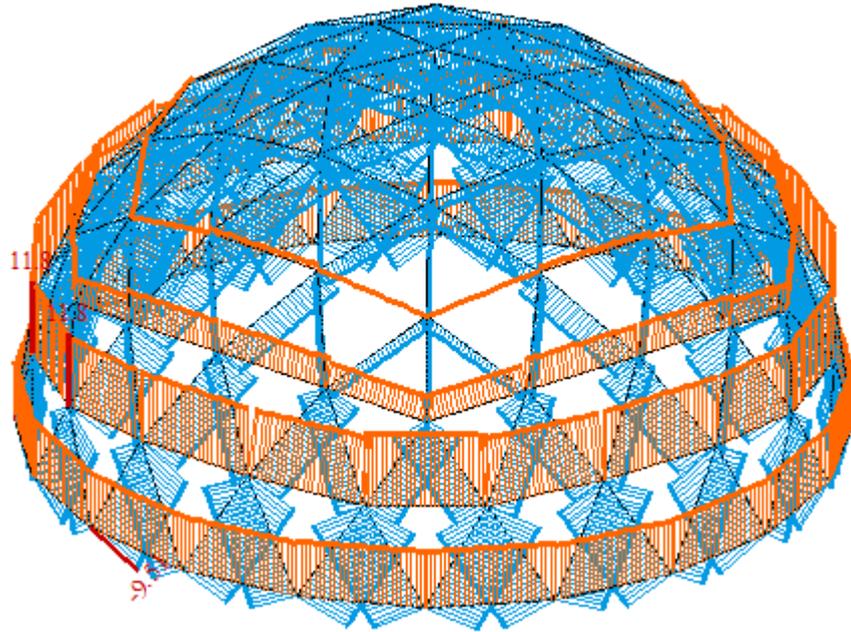
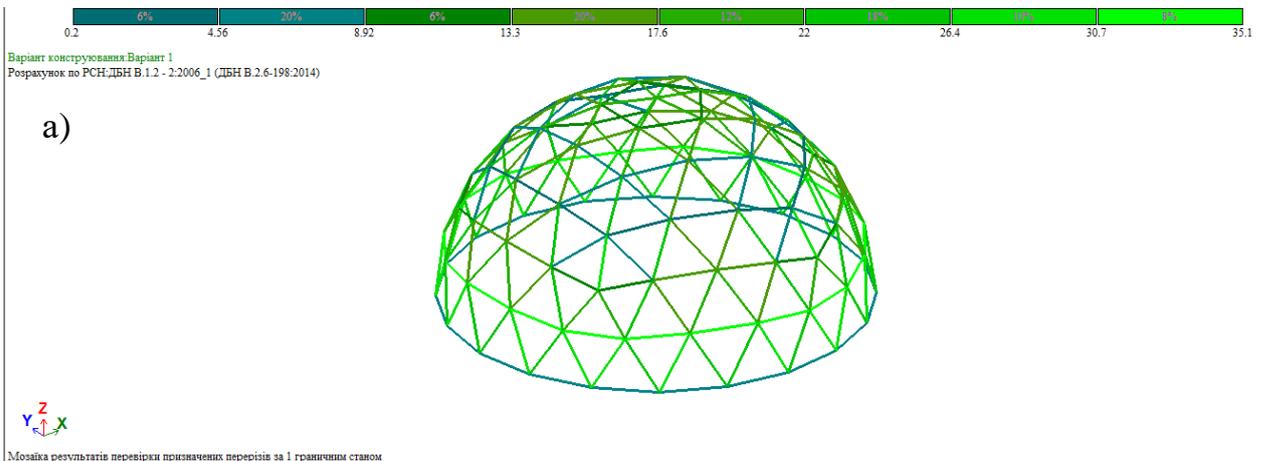


Рис. 6.12 Загальна картина розподілу епюр осьвих сил для сітчастої купольної оболонки на прикладі моделі №1.

6.4 Аналіз ефективності використання попередньо прийнятих перерізів елементів

На рис. 6.13-6.15 представлені мозаїки, що відображають ступінь використання несучої здатності перерізу стержнів типу труба (у %) для конструктивних груп елементів згідно із умовами ІГС та поперечними перетинами, призначеними у вихідних даних.



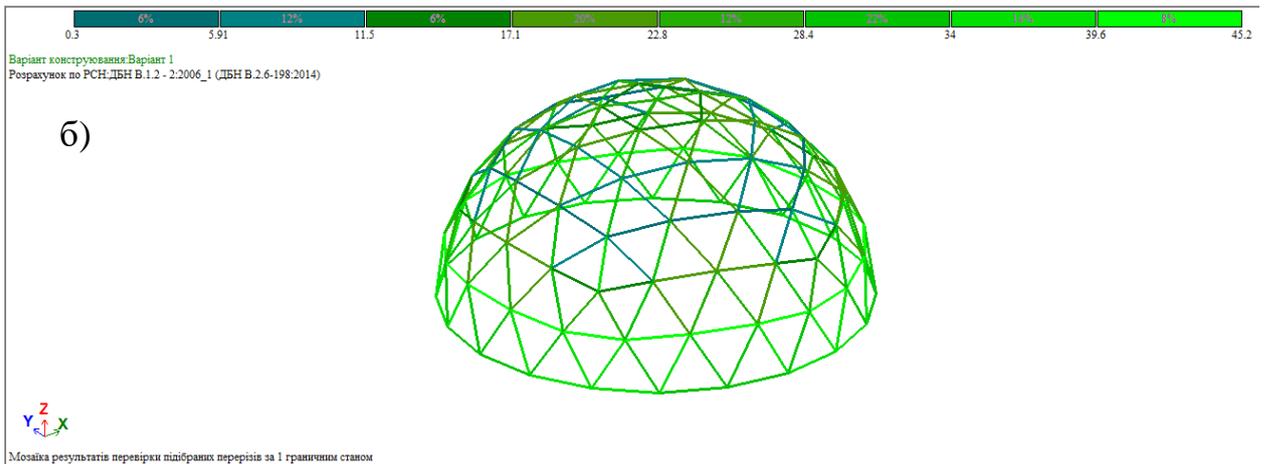


Рис.6.13 Мозаїка результатів для схеми №1: при розрахунку за ІГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності -а; мозаїка результатів розрахунку за ІГС металевих елементів з поперечним перерізами, що є підібраними в модулі «Метал»-б

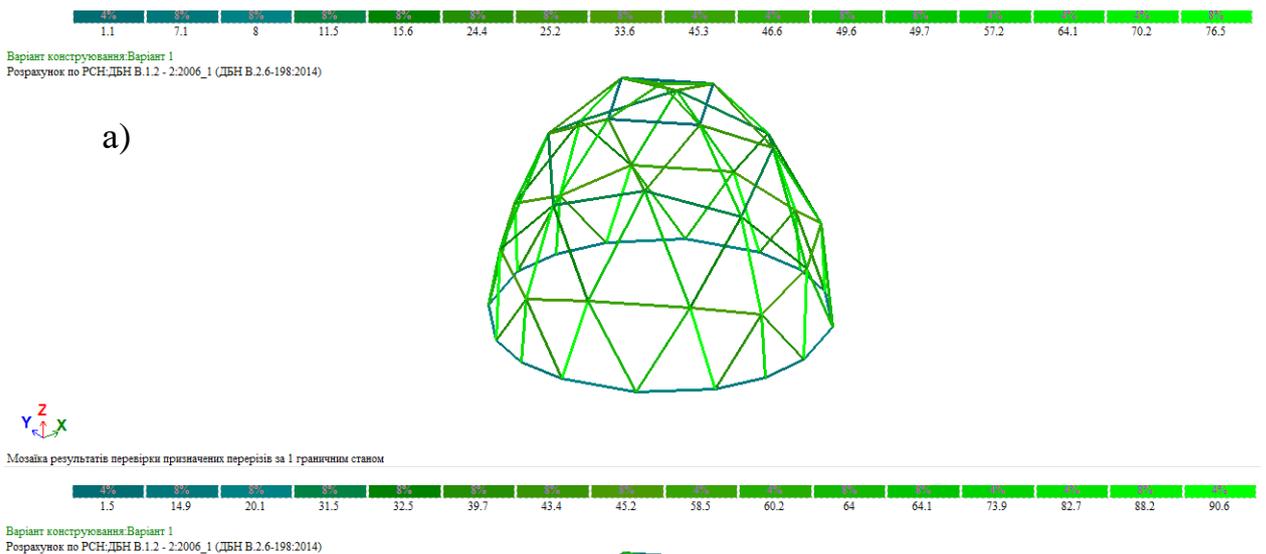


Рис. 6.14 Мозаїка результатів для схеми №4: при розрахунку за ІГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності -а; мозаїка результатів розрахунку за ІГС металевих елементів з поперечним перерізами, що є підібраними в модулі «Метал»-б

*металевих елементів з поперечним перерізами, що є підібраними в модулі
«Метал»-б*

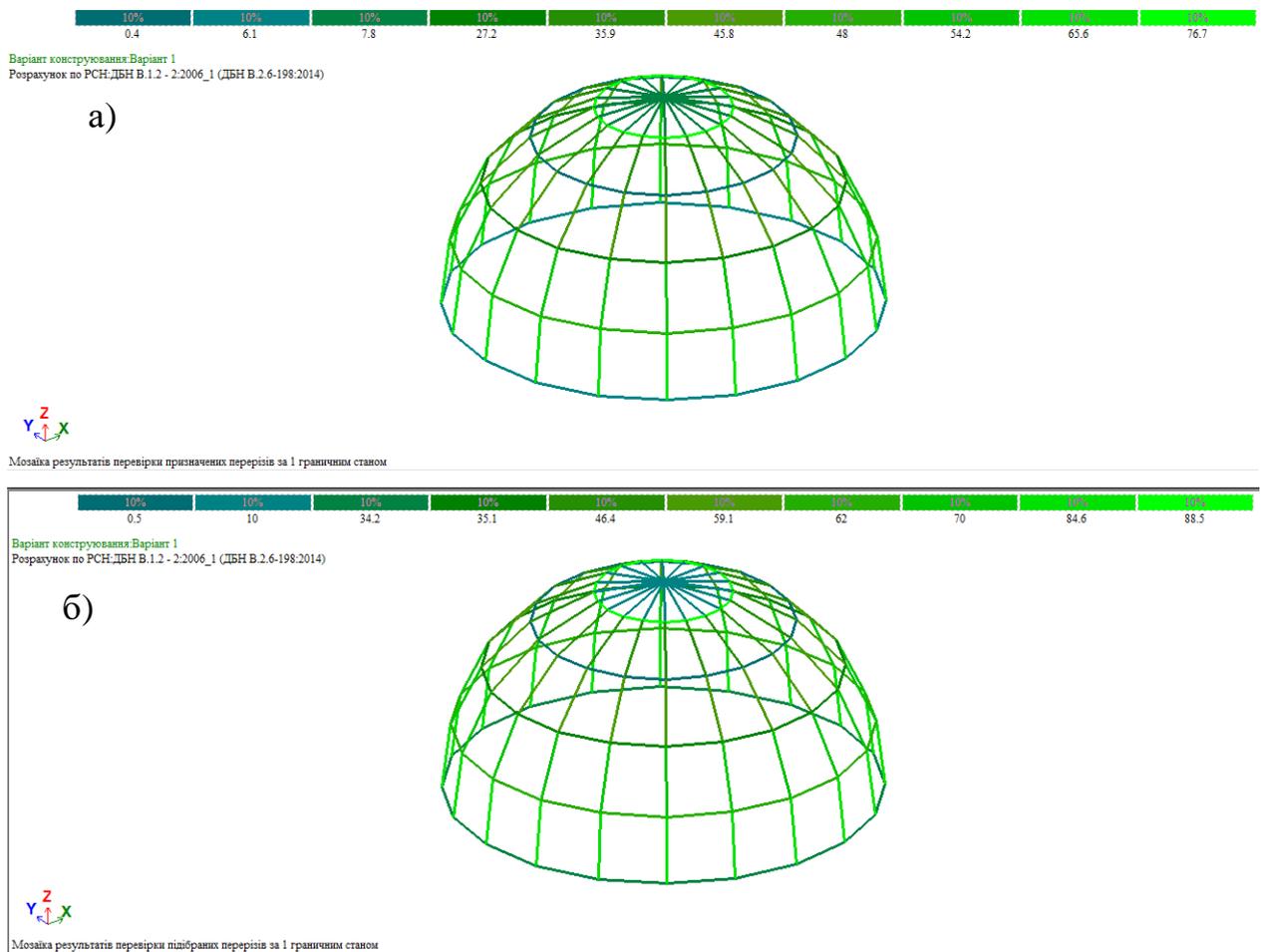


Рис.6.15 Мозаїка результатів для схеми №5: при розрахунку за ІГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності -а; мозаїка результатів розрахунку за ІГС металевих елементів з поперечним перерізами, що є підібраними в модулі «Метал»-б

У таблиці 6.3 вказано відсоток використання поперечного перерізу стрижнів елементів сітчастої поверхні куполів та стержнів опірною кільця для жорсткостей, заданих перед першим ітераційного розрахунку згідно з умовами міцності та стійкості (умови ІГС), а також відсоток використання поперечного перерізу стержнів цих елементів при нових жорсткостях (нових профілях), запропонованих у модулі «Метал» ПК Ліра-САПР.

Таблиця 6.3 - Використання поперечного перерізу стержнів (%)

Вид конструктивної групи стержнів	Схема №1		Схема №2		Схема №3		Схема №4		Схема №5	
	за перерізами, що призначені	за перерізами, що підбрані	за перерізами, що призначені	за перерізами, що підбрані	за перерізами, що призначені	за перерізами, що підбрані	за перерізами, що призначені	за перерізами, що підбрані	за перерізами, що призначені	за перерізами, що підбрані
Поле оболонки	35,1	45,2	59,4	76,7	39,9	51,5	76,5	90,6	76,7	88,5
Опірне кільце	6,2	35,1	9,6	53,9	6	33,5	8	45,2	6,1	34,2

На рис.6.16 наведено % використання перерізу при перевірці за ІГС при в результаті розрахунку з попередньо прийнятими жорсткостями.

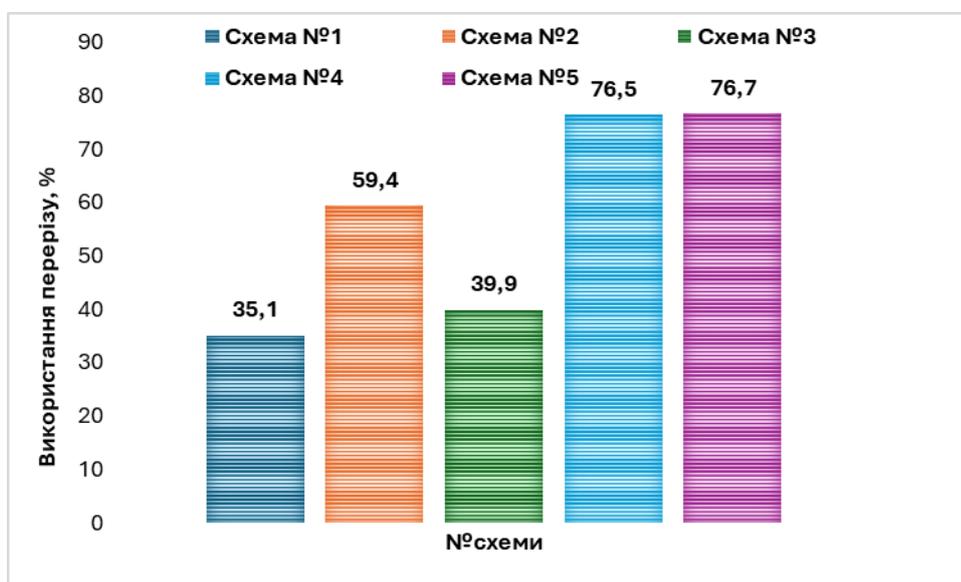


Рис.6.16 .Використання перерізу при перевірці за ІГС при в результаті розрахунку з попередньо прийнятими жорсткостями (у %)

З рис. 6.16 видно, що найбільш повно використані стержні в моделях №3 та 4. Найменш раціонально попередньо прийнято перерізи для моделей №1 та 3.

З таблиці 6.3 також видно, що для всіх моделей прийнято занадто масивний профіль труби для опірної кільця, оскільки відсоток такого використання для всіх моделей становить 6-9,6%.

**6.5 Підбір нових перерізів оболонки після 1-го ітераційного
розрахунку в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР**

В таблицях 6.4-6.6 після першого ітераційного статичного розрахунку наведено результати підбору нових перерізів стержнів поля оболонки та стержнів опірною кілця для моделей, що досліджуються. В таблицях також підраховано й вагу поверхні кожної моделі купольної сітчастої оболонки.

Таблиця 6.4 Підбір елементів **криволінійної поверхні куполу** після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 102x4,5	С245	ТЕ 89x4	0.00838	677,13	5,67
2			ТЕ 89x4	0.00838	416,91	3,49
3			ТЕ 89x4	0.00838	802,72	6,73
4			ТЕ 89x4,5	0.00938	494,32	4,64
5			ТЕ 89x4,5	0.00938	520,8	4,89

Таблиця 6.5 Підбір елементів **опірною кільця** після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 325x6	С245	ТЕ 89x4	0.00838	62,6	0,52
2			ТЕ 89x4	0.00838	62,4	0,52
3			ТЕ 89x4	0.00838	62,6	0,52
4			ТЕ 89x4	0.00838	62,4	0,52
5			ТЕ 89x4	0.00838	66,8	0,56

Таблиця 6.6 Вага моделей сітчастого куполу після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийняті перерізи для груп стержнів	Сталь	Профіль труби	Вага 1 м.п. профілю, т	Загальна довжина стержнів куполу, м	Вага, т
1	ТБ 102x4,5 ТБ 325x6	С245	ТЕ 89x4, ТЕ 89x4	0.00838 0.00838	677,65	68,27
2			ТЕ 89x4 ТЕ 89x4	0.00838 0.00838	417,43	65,89
3			ТЕ 89x4 ТЕ 89x4	0.00838 0.00838	803,24	69,33
4			ТЕ 89x4,5 ТЕ 89x4	0.00938 0.00838	494,84	67,04
5			ТЕ 89x4,5 ТЕ 89x4	0.00938 0.00838	521,36	71,69

На рис. 6.17 наведено діаграму, що відображає значення ваги кожної моделі сітчастого куполу.

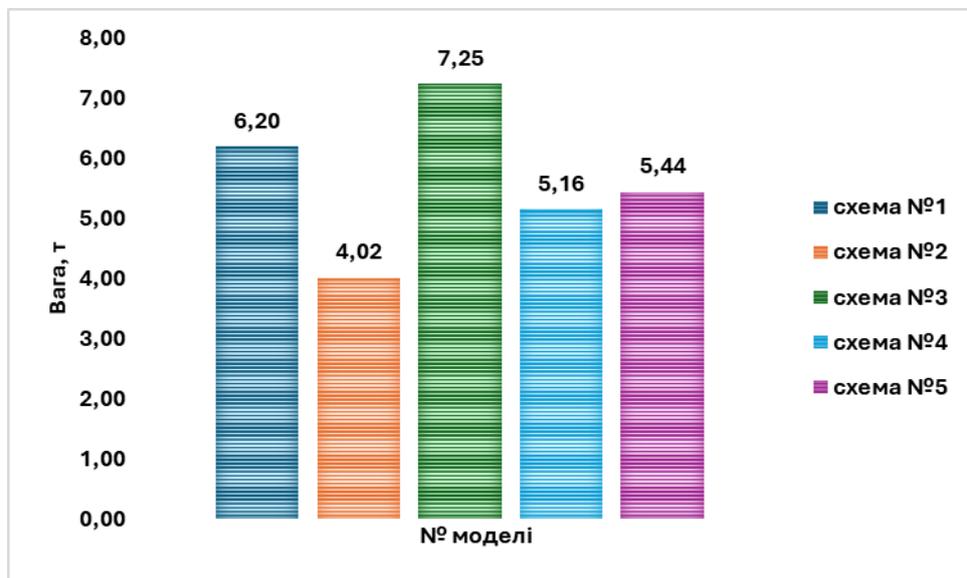


Рис.6.17 Вага моделей сітчастих куполів, що досліджуються

ВИСНОВКИ

1. Створено скінченоелементні схеми деяких геодезичних куполів, що зустрічаються в практиці проектування. СЕ моделі відрізняються одна від одної лише одним параметром – частотою розбивки поверхні.
2. Моделі (№№1-4) мають достатній запас стійкості. Коефіцієнт запасу стійкості для цих моделей є більшим за 1. Але для моделі №5-стратодезичний купол $n=0,73 < 1$, отже модель є нестійкою. Найбільший й значний запас міцності ($n=11,26$) має модель геодезичного сферичного куполу з розбивкою «ікосаедр».
3. Розрахунок на стійкість споруд та будівель є обов'язковим пунктом при проектуванні споруди чи будівлі. Найчастіше Саме втрата стійкості, найчастіше, є тим чинником, що призводить до руйнувань.
Цю важливість показує розрахунок моделі №5, що може зруйнуватися не від руйнації перерізу елементів, а від втрати первісної форми стійкості положення. Тому для такої конструкції треба вжити заходів із її підсилення.
4. Виконано аналіз напруженого стану сітчастих стержньових куполів. Стержні, які розташовуються в радіальному (за меридіональним напрямком) напрямі зазнають зусиль стиску. Проектування таких стержнів слід обов'язково виконувати із перевіркою згідно умов місцевої стійкості. Елементи, які розташовуються за кільцевим напрямом є зазнають зусиль розтягу.
5. Розрахункові моделі, де поздовжні зусилля стиску N в стержнях є найменшими, можна означити, як найбільш ефективну. Зусилля стиску мають найменші значення (рис.6.8) в сферичному куполі, із розбивкою поверхні за ікосаедрами (схема №1 ($N=-9,52$ т) та в геодезичному еліптичному куполі з розбивкою поверхні за ікосаедрами (схема №3) – $N=-13,5$ т. Отже може зробити *висновок*, що розбивка саме за ікосаедром поверхні куполу є найбільш ефективною. Якщо

порівнювати форму твірної саме за такою розбивки, то раціональнішою формою є сферична поверхня, а не еліптична.

6. Розбивка поверхні за октаедрами сприяє виникненню осьових зусиль майже в 2 рази більших, ніж при розбивці першого типу – за ікосаедрами. При аналізі зусиль стиску в моделях з розбивкою за октаедрами (модель №2 та №4) теж ефективнішою з точки зору значення зусиль за модулем є модель №3 - із сферичною, а не еліптичною поверхнею.
7. Визначена ступінь використання (у %) перерізу елементів моделей (первісних жорсткостей), що попередньо прийняті до статичного розрахунку. Так, найменш раціонально використовуються елементи моделі №1 (це доводять й найменші з-поміж інших моделей) значення осьового зусилля $N = 35,1$ т. Тоді як в найбільш напружених моделях (№4 та №5) % використання перерізу за умовами першої групи граничних станів є найбільшими - 76,5 та 76,7% відповідно.

Отже, найбільш раціональною за критерієм максимального % використання перерізу є схема №4. (Схему №5 не розглядаємо, оскільки вона є нестійкою). Слід відзначити, що перевіз опорного кільця первісно був підібраний не раціонально (прийнято завищений номер профілю в декілька разів, від того, що необхідно). Тому % використання перерізу стержнів опорного кільця для всіх моделей становить 6,2-9,6%

8. Слід відмітити, що саме в моделі №1 максимальні значення поздовжнього зусилля на стиск на розтяг є максимально близькими за значенням ($N^+ = 11,8$ т та $N^- = 9,52$ т). За критеріями розподілу зусиль в елементах модель №1 можна відзначити як найбільш ефективну та найбільш стійку.
9. За критеріями розподілу зусиль в елементах модель №1 можна відзначити як найбільш ефективну та найбільш стійку. Але за критерієм технологічності найбільш ефективною моделлю купол за

схемою №1 не можна визначити, оскільки згідно його конструктивних особливостей буде присутньою найбільша кількість коннектів. Це значно збільшує вартість монтажу конструкції (велика частота розбивки його поверхні) та великі працевитрати під час зведення конструкції.

10. Зважаючи на критерій ваги, найлегшою конструкцією буде модель №2 геодезичного сферичного куполу з розбивкою за октаедрами.

Хоча така модель не відрізняється найменшими показниками напруженого стану, **але вирішальну роль в кінцевій вазі відіграє саме частота розбивки поверхні, тобто загальна довжина стержнів, що формують поверхню.** Ця вага для моделі №2 є найменшою, що й обумовлює загальну найменшу її вагу з-поміж усіх інших моделей, що досліджувалися.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження та впливи. Норми проектування
2. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. К.: Мінрегіон України, 2014. 15 с.
3. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. [Чинний від 2007-01-01] К.: Мінбуд України, 2006. (Національний стандарт України)
4. Indrawan, Stephanus & Purwoko, Gervasius & Noviyanto, Tri. (2020). The use of minimal surface principles and multiplex joinery system for designing post-disaster construction systems. ARTEKS : Jurnal Teknik Arsitektur. 5. 347-358. 10.30822/arteks.v5i3.488.
Режим доступу:
https://www.researchgate.net/publication/346878604_The_use_of_minimal_surface_principles_and_multiplex_joinery_system_for_designing_post-disaster_construction_systems
5. Geodesic dome. Режим доступу: Geodesic dome | Sustainable Design, Modular Construction & Hexagonal Shapes | Britannica
6. Geodesic Domes. Режим доступу: Domes – Buckminster Fuller Institute
7. Geodesic Dome - What Is It And How Can You Use It?. Режим доступу: geodesic dome - Google Search
8. Lira-САПР. Програма для проектування і розрахунку будівельних конструкцій. Режим доступу: <https://www.liraland.ua/lira/>
9. Eselectro.com.ua [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – Режим доступа: <https://eselectro.com.ua/energy-saving-home-a-geodesic-dome-frame-8-m.html> (дата звернення 15.09.2018). – Назва з екрана.

10. Isu.org.ua [Електронний ресурс]: [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://isu.org.ua/kupolni-budynky-pryklady-ta-oglyad-tehnologij-budivnytstva/> (дата звернення 15.09.2018). – Назва з екрана.
11. Simplydifferently.org https://www.simplydifferently.org/Geodesic_Dome_Diary [Електронний ресурс]: [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – Режим доступу: https://www.simplydifferently.org/Geodesic_Dome_Diary (дата звернення 15.09.2018). – Назва з екрана.
12. Купольные дома [Електронний ресурс]: [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – Режим доступу: <http://geodesic.com.ua/geodesic-kupol/types.html>
13. Bysiec, D., & Maleska, T. (2023). Influence of the mesh structure of geodesic domes on their seismic response in applied directions. *Archives of Civil Engineering*, 69, Article 3. <https://doi.org/10.24425/ace.2023.146067>
14. Bysiec, D., Jaszczynski, S., & Maleska, T. (2024). Analysis of Lightweight Structure Mesh Topology of Geodesic Domes. *Applied Sciences*, 14(1), 132. <https://doi.org/10.3390/app14010132>
15. Zabojszcza, Paweł & Radoń, Urszula. (2020). Stability analysis of the single-layer dome in probabilistic description by the Monte Carlo method. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 58. [10.15632/jtam-pl/118950](https://doi.org/10.15632/jtam-pl/118950).
16. Zabojszcza, Paweł & Radoń, Urszula. (2019). Effect of Increased Density of Nodes in Geodesic Dome on its Critical Load Capacity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 471. 052051. [10.1088/1757-899X/471/5/052051](https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/5/052051).
17. M Abu-Khasan, V Egorov, D Charnik and E Nikonova (2022) *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 988 052007 [DOI 10.1088/1755-1315/988/5/052007](https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/5/052007)

18. J.P.G. Carvalho, A.C.C. Lemonge, P.H. Hallak, and D.E.C. Vargas, "Simultaneous sizing, shape, and layout optimization and automatic member grouping of dome structures", *Structures*, vol. 28, pp. 2188-2202, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.10.016.
19. J. Ye and M. Lu, "Optimizations of domes against instability", *Steel and Composite Structures*, vol. 28, no. 4, pp. 427-438, 2018, doi: 10.12989/scs.2018.28.4.427.
20. M.P. Saka, "Optimum topological design of geometrically nonlinear single layer latticed domes using coupled genetic algorithm", *Computers and Structures*, vol. 85, no. 21-22, pp. 1635-1646, 2007, doi: 10.1016/j.compstruc.2007.02.023.
21. A. Kaveh and S. Talatahari, "Geometry and topology optimization of geodesic domes using charged system search", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 43, no. 2, pp. 215-229, 2011, doi: 10.1007/s00158-010-0566-y.
22. S. Carbas and M.P. Saka, "Optimum topology design of various geometrically nonlinear latticed domes using improved harmony search method", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 45, no. 3, pp. 377-399, 2012, doi: 10.1007/s00158-011-0675-2.
23. Bysiec Dominika , Maleska Tomasz.(2023) Influence of the mesh structure of geodesic domes on their seismic response in applied directions/ *Archives of Civil Engineering*. Vol. 69, nr 3, p. 65--78
24. S. Gholizadeh and H. Barati, "Topology optimization of nonlinear single layer domes by a new metaheuristic", *Steel and Composite Structures*, vol. 16, no. 6, pp. 681-701, 2014, doi: 10.12989/scs.2014.16.6.681.
25. A. Kaveh and M. Rezaei, "Optimum topology design of geometrically nonlinear suspended domes using ECBO", *Structural*

Engineering and Mechanics, vol. 56, no. 4, pp. 667-694, 2015, doi: 10.12989/sem.2015.56.4.667.

- 26 A. Kaveh and M. Rezaei, "Topology and geometry optimization of single-layer domes utilizing CBO and ECBO", *Scientia Iranica*, vol. 23, no. 2, pp. 535-547, 2016, doi: 10.24200/sci.2016.2137
- 27 D. Pilarska, "Octahedron - based spatial bar structures - the form of large areas covers", presented at 3RD Scientific Conference Environmental Challenges in Civil Engineering, Opole, Poland, 23-25 April 2018, Opole, Poland, 2018.
- 28 D. Pilarska, "Optimization approach for dome structures", presented at The XXVII Conference of Lightweight Structures in Civil Engineering, 2021, Lodz, Poland, 2021.

ДОДАТКИ

**Сумський національний
аграрний університет**

Кафедра будівельних конструкцій

Дослідження роботи криволінійного структурного покриття

Виконав: Рева Є.Є.

Керівник: Срібняк Н.М.

Суми-2024

- Світова практика архтектурно-будівельного проектування, в якій геодезичні куполи визнані найбільш раціональними та ефективними з точки зору статичної роботи сітчастими оболонковими системами.
- Тому дослідження сітчастих куполіє є **актуальною задачею** та ця тема має значний потенціал для розвитку.
- **Метою числового** дослідження є аналіз ефективності тіжеї чи іншої моделі куполу (геодезичного стратодезичного) за декількома критеріями – напружено-деформованого стану, матеріалоемності.

- Для досягнення поставленої мети були визначені такі **задачі**:
 - вивчення історії виникнення та розвитку геодезичних й стратодезичних куполів;
 - ознайомлення із геометрією та особливостями формоутворення різних типів геодезичних куполів; ознайомлення також з можливими конструктивними рішеннями та методами їх зведення;
 - обрання до дослідження розрахункових схем сітчастих куполів;
 - проведення числового дослідження з розрахунку скінченоелементних схем стержневих куполів за допомогою ПК «Ліра».

Об'єкт дослідження – розрахункові скінченоелементні моделі обраних типів стержневих сітчастих геодезичних та стратодезичного куполів-оболонок.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан скінченоелементних моделей, вага моделей, що досліджуються.

Практичне значення результатів, що отримані

Результати числових розрахунків дозволяють визначити з-поміж розрахункових моделей сітчастих оболонок, які досліджуються, найбільш ефективну модель за критерієм матеріалоемності, тобто визначити модель із найменшою вагою.

Приклади вирішення сітчастих куполів

геодезичних (а)



стратодезичних (б)



Геодезичний купол являє собою це не просто набір трикутників, з'єднаних особливим способом. Геометрична симетрія забезпечує поєднання міцності й компактності, створюючи ефект виняткової новизни.

Осьова симетрія дозволяє поділити **стратодезичний купол** на значно більшу кількість горизонтальних шарів, що обмежені паралельними площинами, порівняно з радіальною симетрією. Це робить стратодезичні куполи більш адаптованими як до традиційних методів будівельного проектування, так і до потокових технологій складання



Рис. Геодезичний купол, окреслений за тетраедром

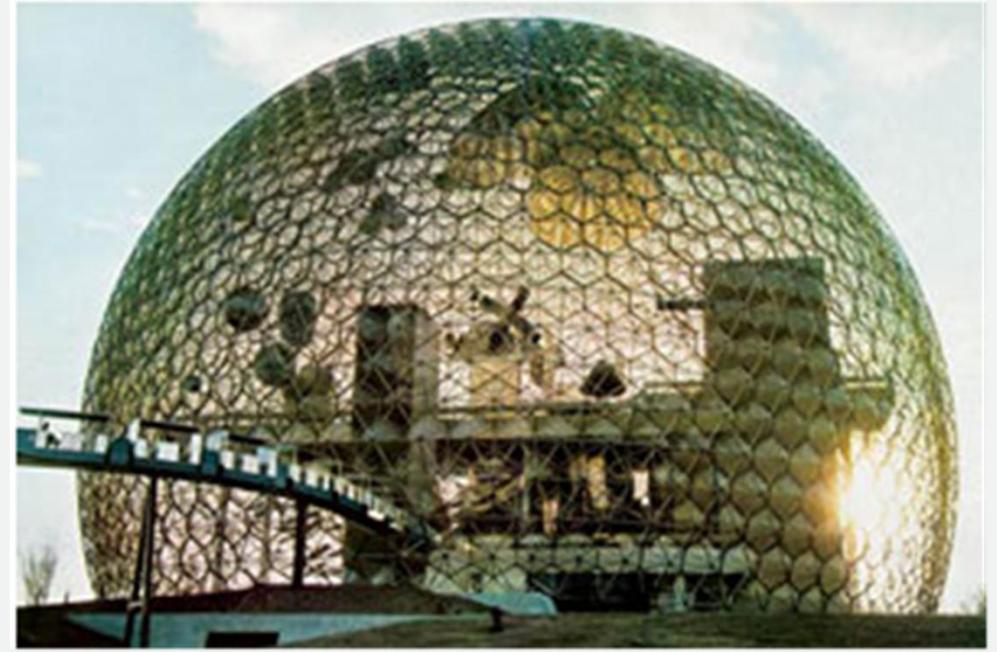


Рис. Купол - павільйон США на Всесвітній виставці в Монреалі (автор-Б.Фулер)

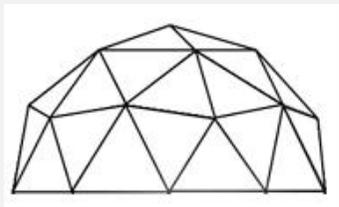


Рис.. Сучасність.
Застосування геодезичних куполів

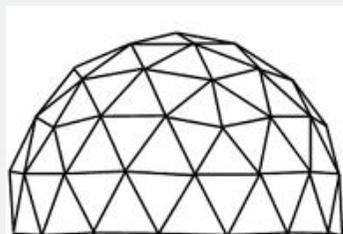
МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Метод аналізу
2. Метод скінчених елементів в механіці конструкцій
3. Методика підбору перерізів сталевих елементів за нормами
4. Аналітична обробка результатів розрахунків

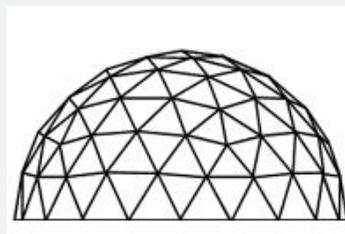
• Частота розбиття (або апроксимаційна точність) визначає, із якою точністю геодезична купольна поверхня наближається до форми ідеального купола. Теоретично можна передбачити що, чим вища частота розбивки, тим міцнішою буде конструкція. Частота розбивки маркується літерою «V».



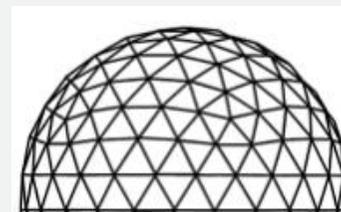
Геодезичний купол з частотою 2V. Висота - $1/2$ сфери.



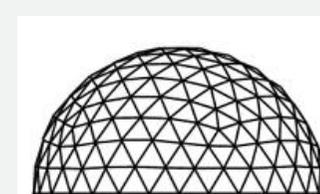
Геодезичний купол з частотою 3V. Висота - $5/8$ сфери.



Геодезичний купол з частотою 4V. висота – $1/2$ сфери

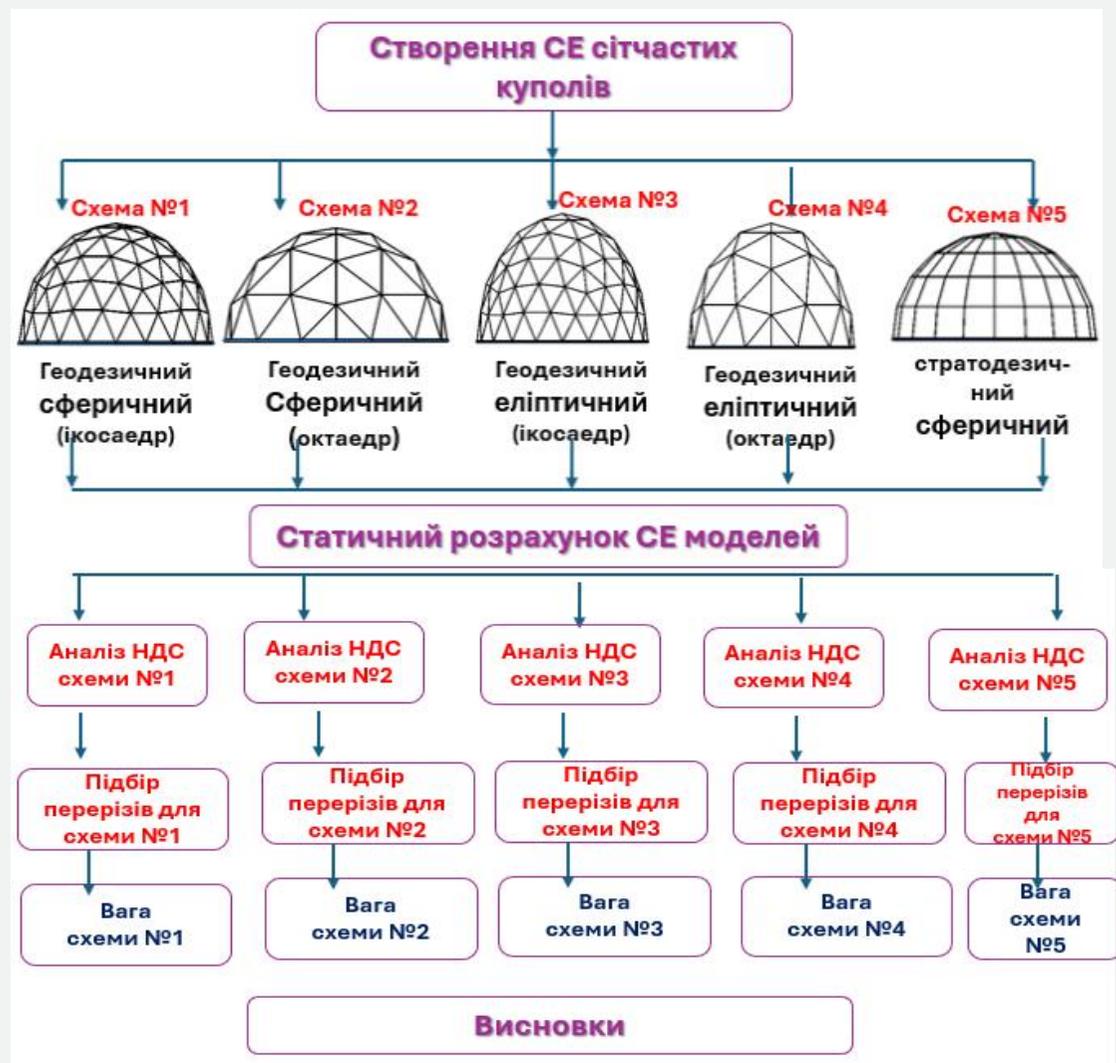


Геодезичний купол з частотою 5V. Висота - $5/8$ сфери



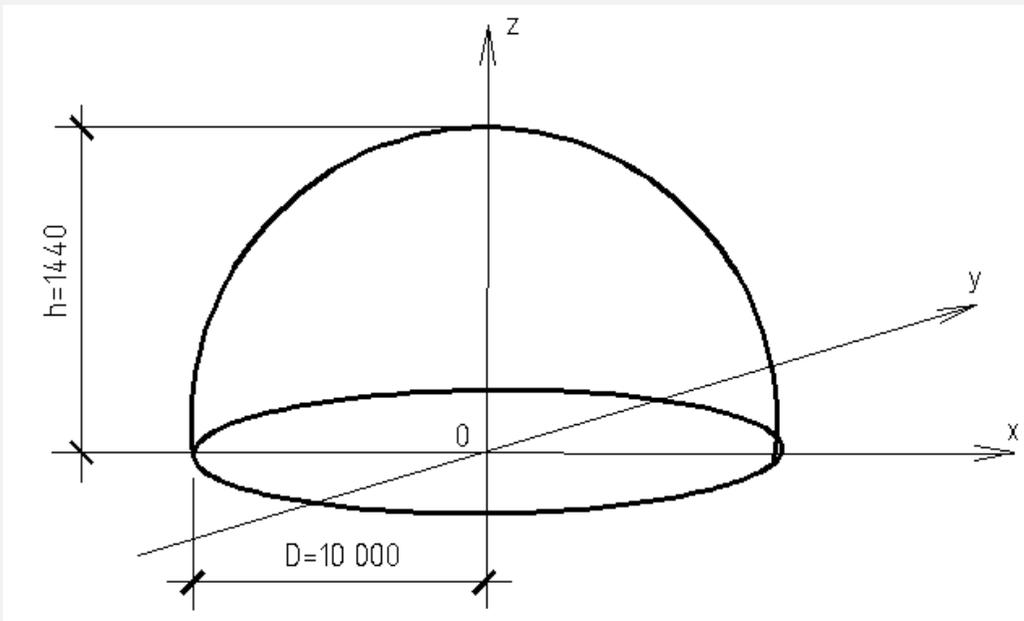
Геодезичний купол з частотою 6V. Висота – $1/2$ сфери

Алгоритм виконання дослідження із використанням методу скінчених елементів



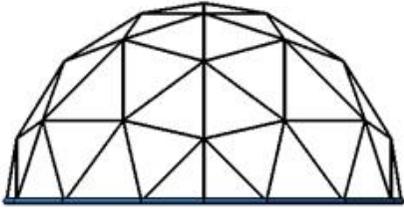
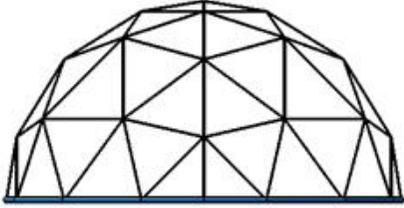
Моделювання розрахункових схем сітчастих куполів

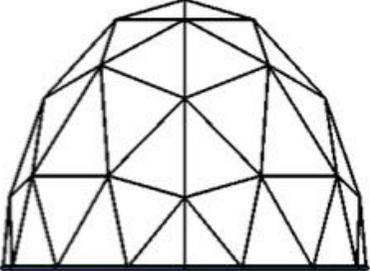
Єдина геометрична схема для різних типів розрахункових кінцевоелементних схем



Враховуючи вищеописані особливості утворення форми геодезичних куполів), розробимо куполи з різною частотою розбивки, але з однаковими іншими параметрами. Це означає, що висота конструкції $h = 14,4$ м і її проліт (чи діаметр) $D = 20,0$ м будуть однаковими для всіх варіантів

Скінченоелементні розрахункові схеми, що досліджуються в роботі

№ схеми	Тип твірної/ назва куполу	Частота розбивки поверхні	Вигляд куполу/назва
1.	Дуга кола/сферичний	ікосаедр	 геодезичний
2.	Дуга кола/сферичний	октаедр	 геодезичний
3.	Дуга еліпсу/еліптичний	ікосаедр	 геодезичний

№ схеми	Тип твірної/ назва куполу	Частота розбивки поверхні	Вигляд куполу/назва
4.	Дуга еліпсу/еліптичний	октаедр	 геодезичний
5	Дуга кола/сферичний	-	 стратогеодезичний

Параметри схем при їх створенні

Таблиця. Характеристики вихідних даних жорсткості для стержнів куполу

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м ²	R, т/м ³		C235	q, т/м
1. Стержень сферичної поверхні	Труба ТБ 159 х4.5 (ДСТУ 8938:2019)	2,1·10 ⁷	7,85	0,3	C235	0.0108158
2. Стержень опірною кільця	Труба ТБ 325х6 (ДСТУ 8938:2019)	2,1·10 ⁷	7,85	0,3	C235	0.0471829

Конструкція куполів шарнірно приєднується до фундаменту. З'єднання стержнів поля куполу прийнято шарнірним,

Таблиця. Завантаження, що прийнято до розрахунку

№ завантаження	Характеристика
№ 1	- Тип - постійне, власна вага плити, що задавалася автоматично ПК Ліра-САПР й зазнавала змін на кожній ітерації підбору перетинів груп конструктивних елементів
№ 2	Тип - постійне та являє собою власну вага конструктивних шарів покрівлі
№ 3	Тип – тимчасове, снігове для м. Суми

Навантаження у Завантаженнях №2 та 3 від рівномірно розподіленого навантаження приведені до вузлових навантажень згідно вантажній площі для вузлів криволінійної поверхні.

РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ МОДЕЛЕЙ

Аналіз деформативності моделей

Таблиця 1 - Максимальні вертикальні переміщення вузлів моделей куполу від РСН 2

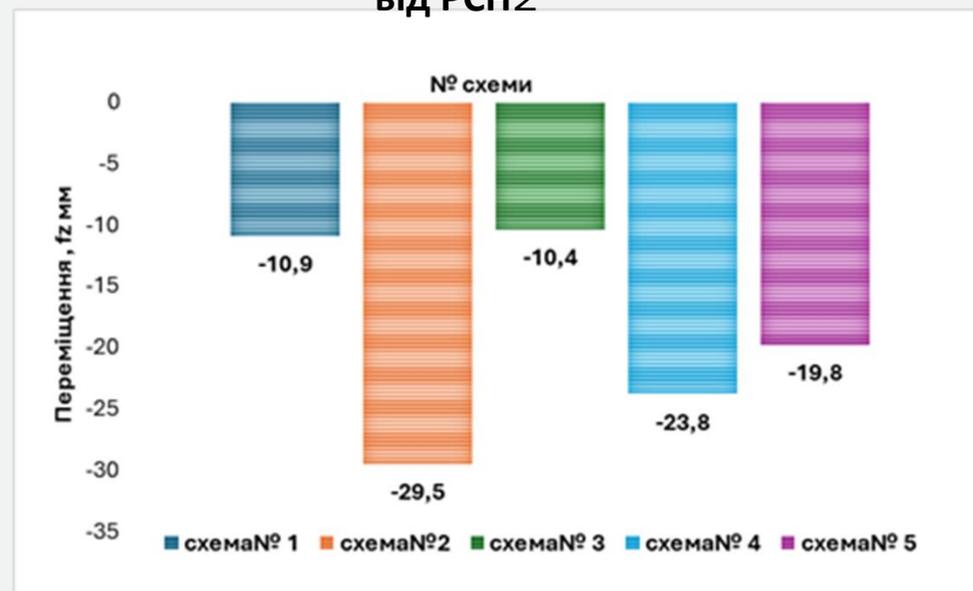
№ схеми куполу	Переміщення, fz [мм]		
	РСН1	РСН2	РСН3
Схема № 1	-0,73	-10,9	-9,89
Схема № 2	-1,44	-29,5	-26,7
Схема № 3	-0,593	-10,4	-9,46
Схема № 4	-1,14	-23,8	-21,6
Схема № 5	-1,01	-19,8	-18

Максимальний граничний прогин за ДСТУ «Прогини та переміщення» для моделей оболонки становить 80 мм:

$$f_u = \frac{L}{250} = \frac{2000}{250} = 8 \text{ см}$$

Тому всі моделі є достатньо жорсткими. Але для моделі №2 максимальний вертикальний прогин є майже в 3 рази більшим, ніж для моделей №1 та №3, а для моделей №4,5 є в 2 рази більшим, ніж для моделей №1 та №3.

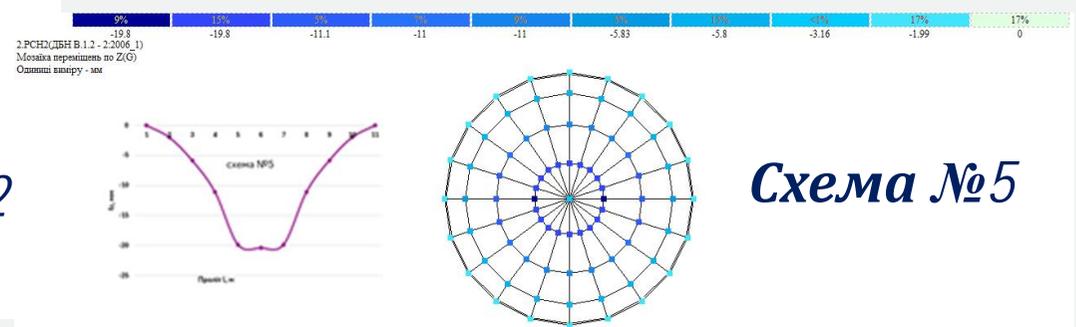
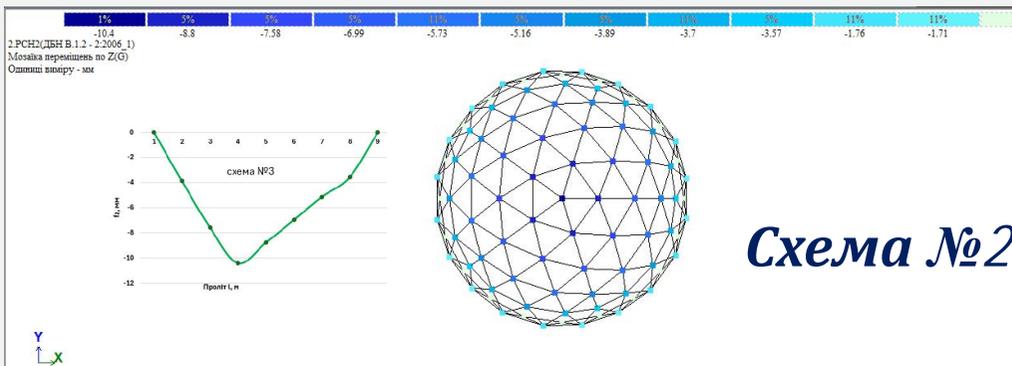
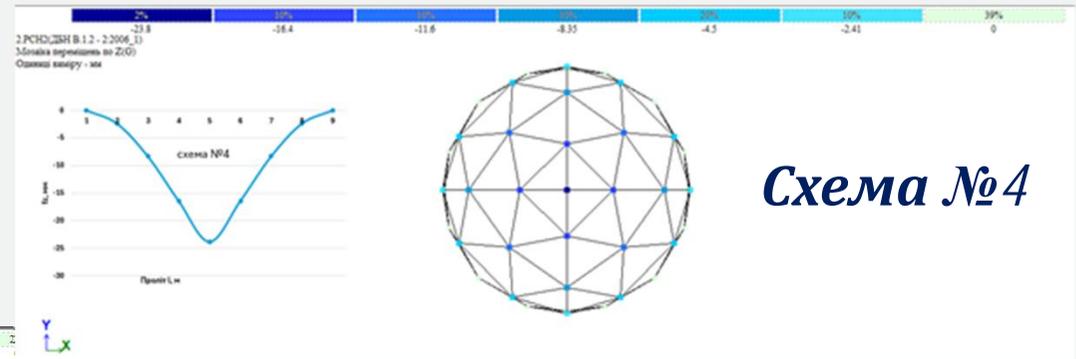
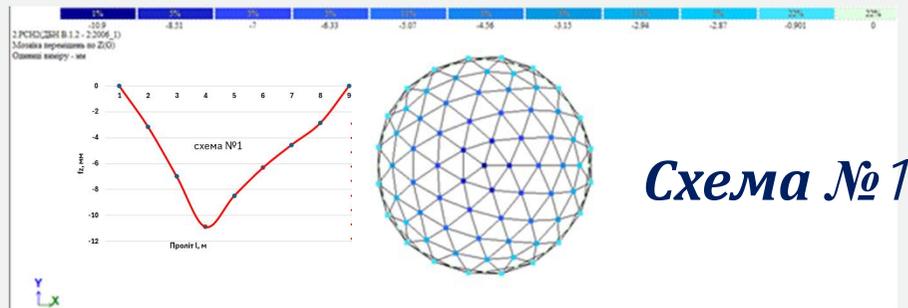
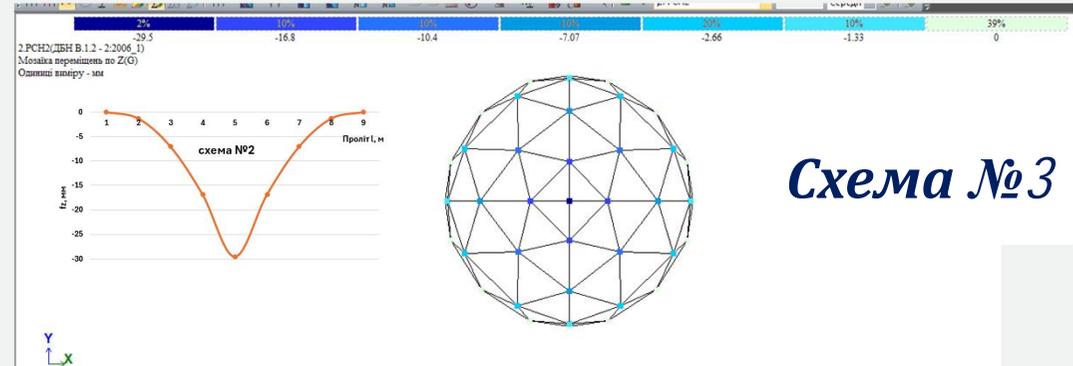
Максимальні вертикальні переміщення вузлів системи від РСН2



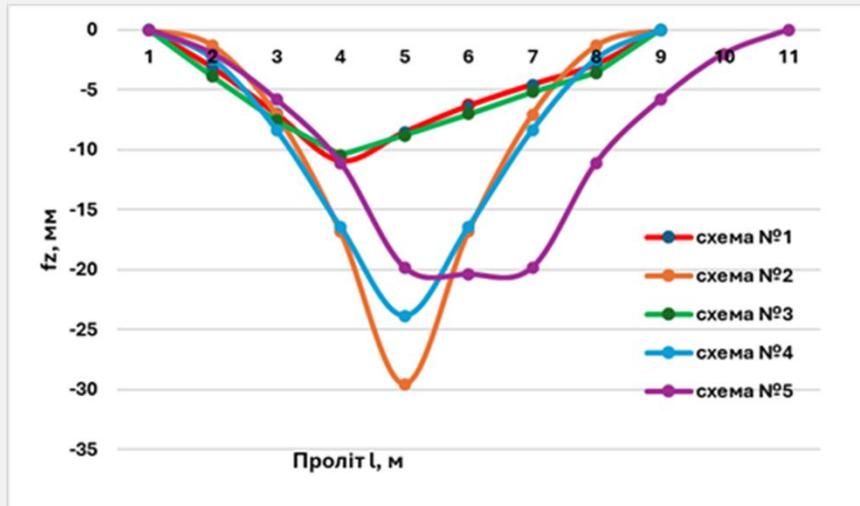
Очевидно, що максимальні переміщення вузлів по вертикалі виникають від РСН 2. Найменш деформативною, тобто найбільш жорсткою буде схема №1- сферичний геодезичний купол із найбільшою частотою розбивки поверхні.

Аналіз деформативності моделей

Мозаїка вертикальних переміщень вузлів оболонок від РСН 2



Графік вертикальних переміщень вузлів в поперечному перерізі моделей сітчастих купольних оболонок



Деформовані схеми куполів від вертикального завантаження (від РСН2)

Схема №1

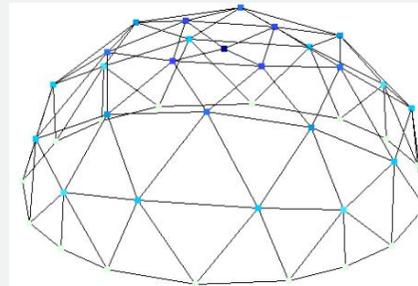


Схема №2

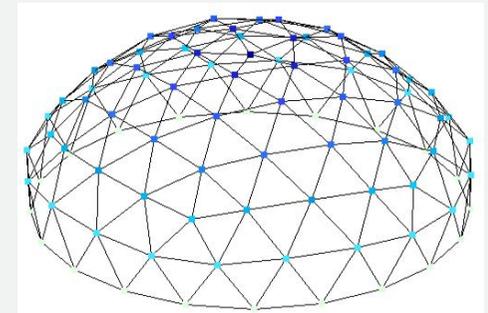


Схема №3

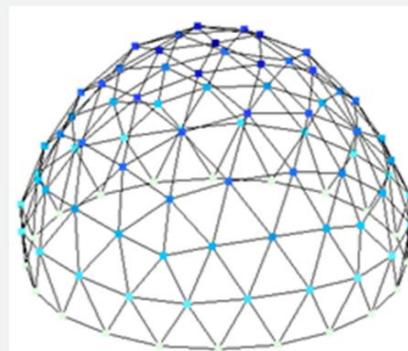


Схема №4

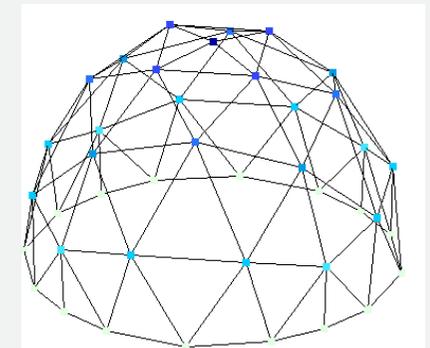
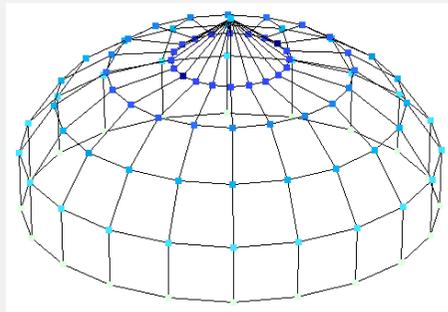


Схема №5



Аналіз стійкості моделей

- Розрахунок **оболонок на стійкість** є одним з ключових розрахунків при їх проектуванні. Оболонки характеризуються високою міцністю, але їх **недостатня стійкість може стати критерієм, який обмежує їх несучу здатність**. Під час розрахунку за граничним навантаженням (розрахунок на стійкість) застосовується коефіцієнт запасу стійкості, який показує, в скільки разів можна збільшитися навантаження, перш ніж система втратить стійкість.

$$n = \frac{P_{cr}}{P}$$

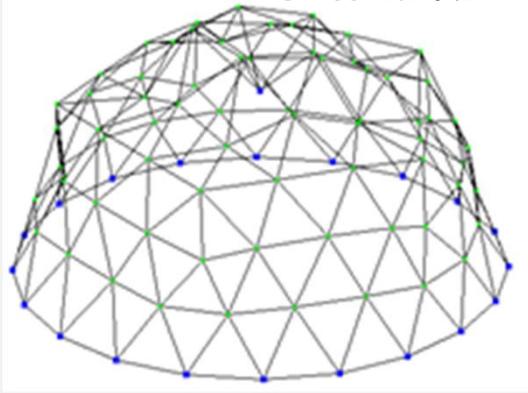
де P – розрахункове навантаження;
 P_{cr} – навантаження, що відповідає втраті стійкості чи появі можливості існування нових форм рівноваги системи.

Запас стійкості визначає величину впливу, який може порушити систему, але при цьому вона повернеться до початкового стану рівноваги. Наприклад, при ударі по колоні (стовпу) вона може захитатися, але залишиться стояти.

Форми втрати стійкості від РСН2 для моделей, що досліджуються

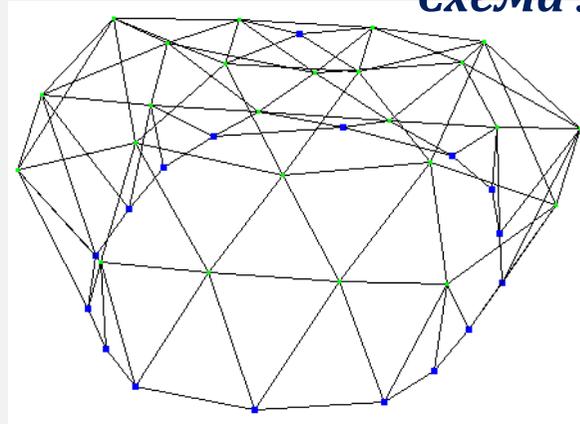
2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Форма втрати стійкості у гл. с. 1
Коефіцієнт 11.2663

Схема №1



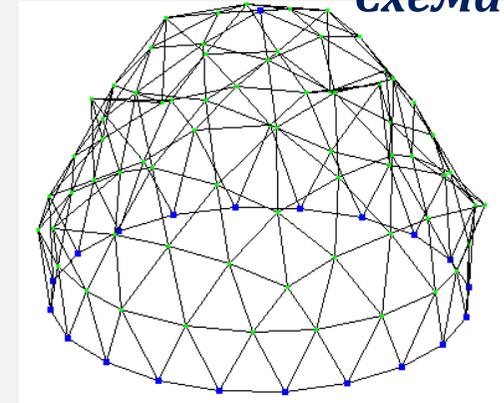
2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Форма втрати стійкості у гл. с. 1
Коефіцієнт 2.60904

Схема №2



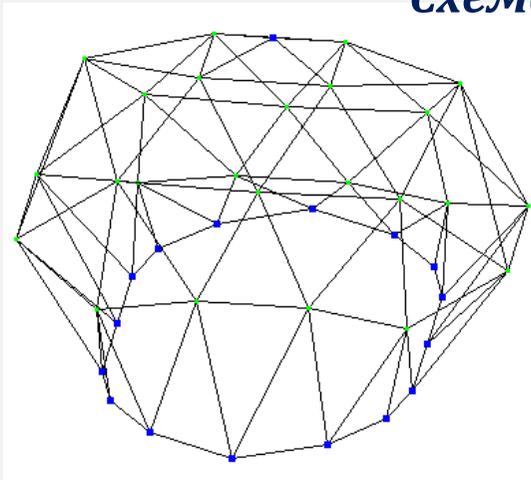
2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Форма втрати стійкості у гл. с. 1
Коефіцієнт 5.51962

Схема №3



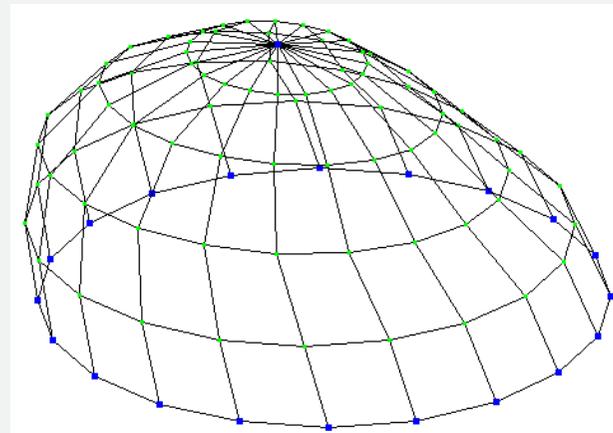
2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Форма втрати стійкості у гл. с. 1
Коефіцієнт 1.52428

Схема №4



2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Форма втрати стійкості у гл. с. 1
Коефіцієнт 0.72395

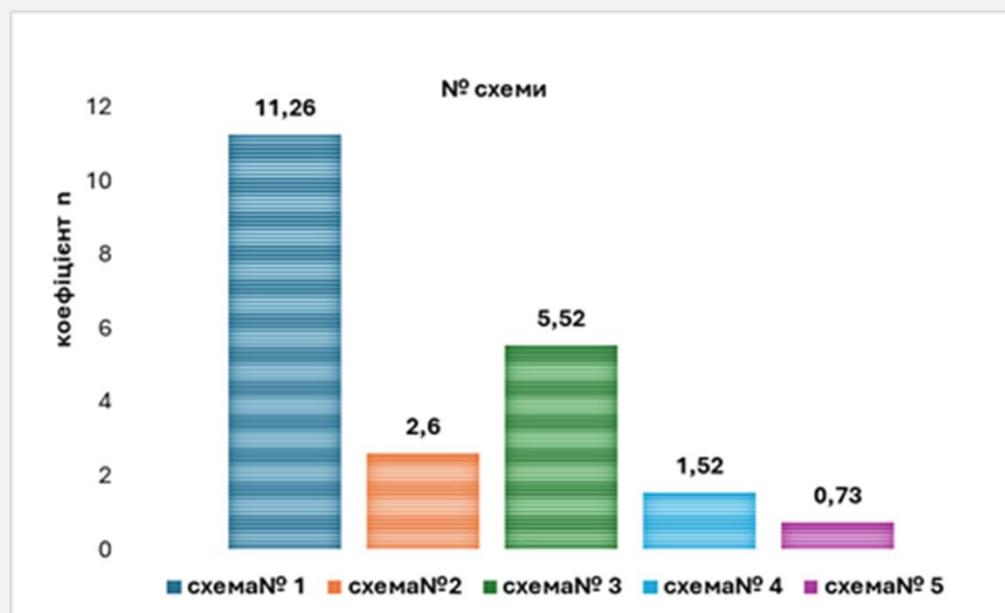
Схема №5



Таблиця 1 - Коефіцієнти запасу стійкості n

Схема № 1	Схема № 2	Схема № 3	Схема № 4	Схема № 5
11,26	2,6	5,52	1,52	0,73

Рис. Коефіцієнти запасу стійкості для моделей, що розглядаються



Конструкції мають різний запас стійкості.

Так, модель №5 - стратодезичний купол має коефіцієнт запасу стійкості $n=0,72 < 1$, **тому така система є нестійкою**. Отже, конструкція може втратити первісне положення рівноваги під навантаженням не від руйнування матеріалу стержнів, а від втрати стійкості положення.

Також еліптичний купол, побудований на основі ікосаедра, є стійкішим за еліптичний купол, побудований на основі октаедра.

Зі збільшенням частоти розбиття поверхні куполу конструкція стає більш стійкою.

Мінімальний запас стійкості має модель №4 ($n_4=1,52$). Достатній запас стійкості мають моделі №2 ($n_2=2,6$), №3 ($n_3=5,52$) та схема №1 ($n_1=11,26$).

Найбільший більш ніж десятикратний запас міцності має модель №1- геодезичний сферичний купол, побудований на основі ікосаедра.

2 РСН2/ДБН В.1.2.-2:2006_1)
 Москва N
 Опинити вмісту - т

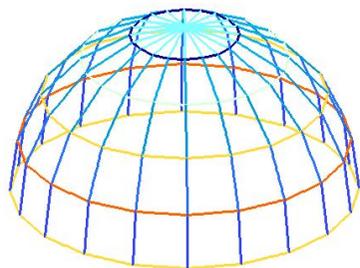


Схема №5

Рис. Діаграми максимальних осьових сил N , що діють в опорному кільці купольних моделей, що досліджуються, від РСН2

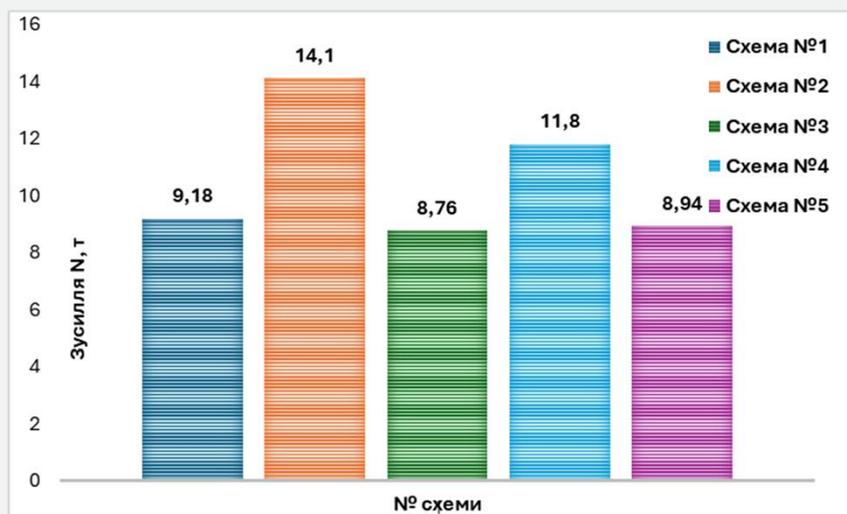
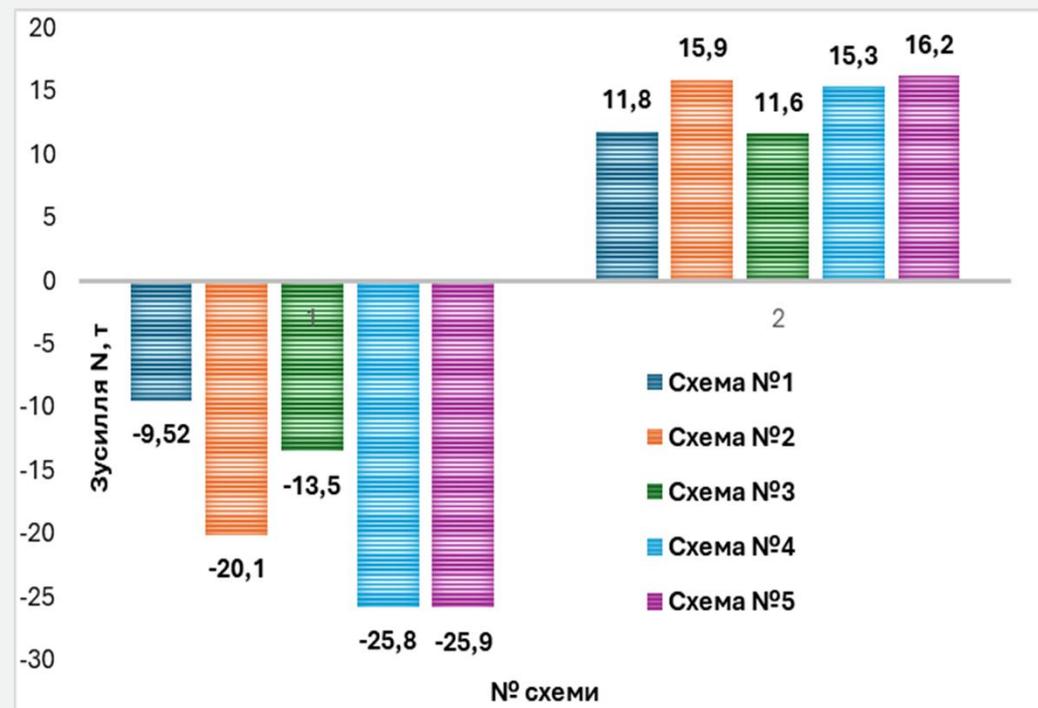


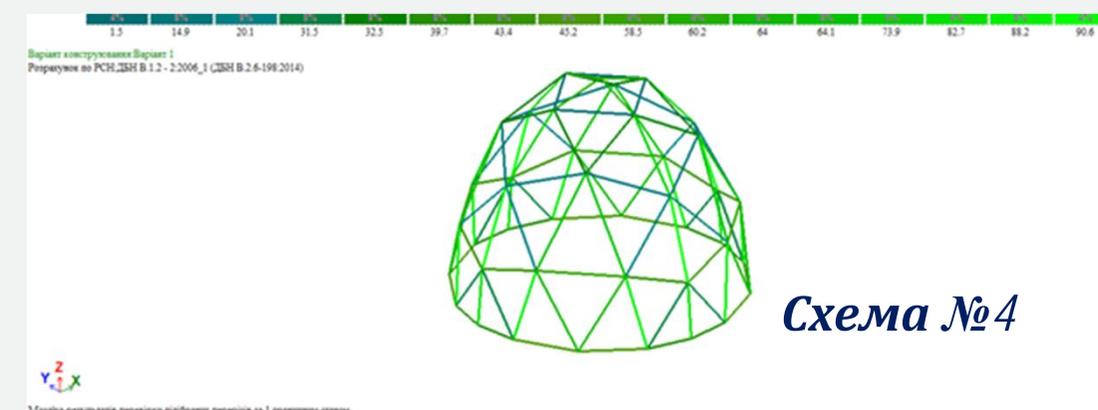
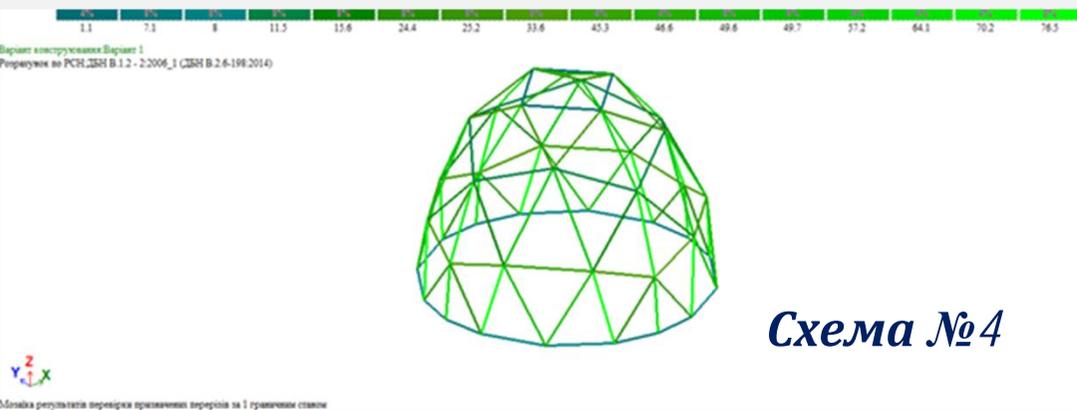
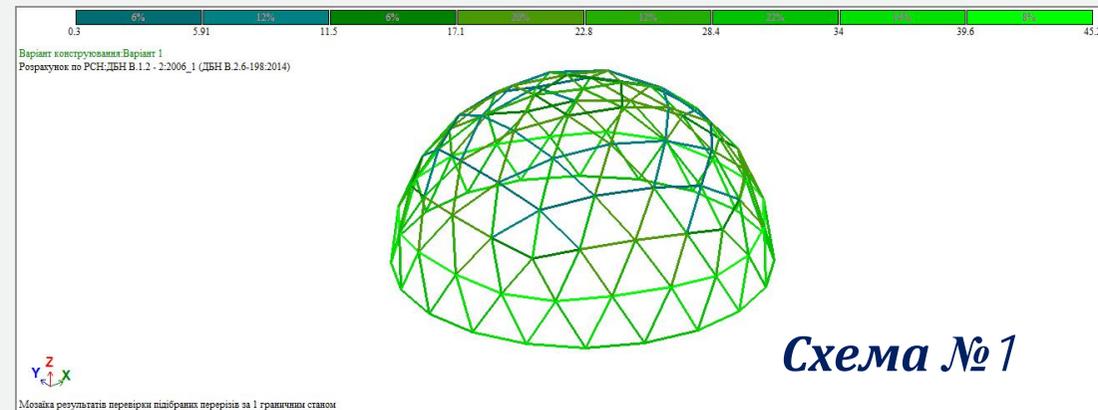
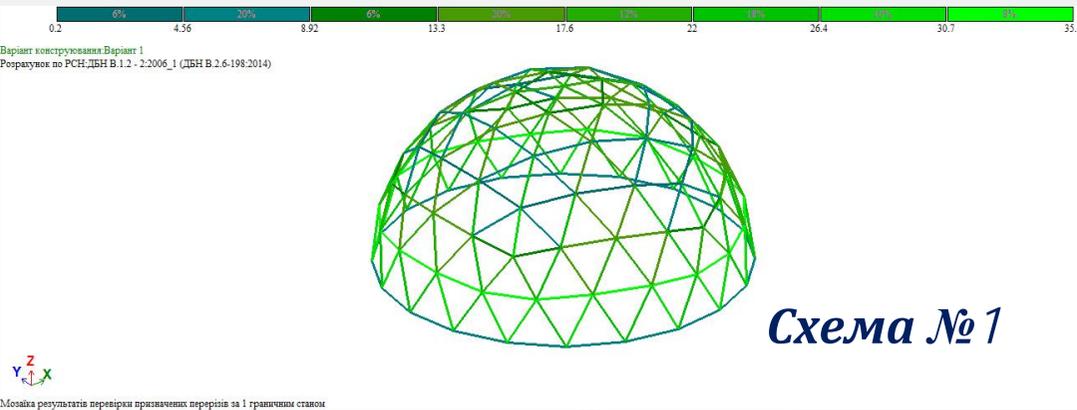
Рис. Діаграми максимальних осьових сил N , що діють в стержнях криволінійної поверхні купольних моделей, що досліджуються, від РСН2



Аналіз ефективності використання попередньо прийнятих перерізів елементів

Моzaїка результатів для схеми №1 при розрахунку за 1 ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності (для схем №№1, 4)

Моzaїка результатів розрахунку за 1 ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що є підібраними в модулі «Метал» (для схем №№1, 4)



Таблиця 1 - Використання поперечного перерізу стержнів (%) за 1ГС

Вид конструктивної групи стержнів	Схема №1		Схема №2		Схема №3		Схема №4		Схема №5	
	за перерізами, що призначені	за перерізами, що підібрані	за перерізами, що призначені	за перерізами, що підібрані	за перерізами, що призначені	за перерізами, що підібрані	за перерізами, що призначені	за перерізами, що підібрані	за перерізами, що призначені	за перерізами, що підібрані
Поле оболонки	35,1	45,2	59,4	76,7	39,9	51,5	76,5	90,6	76,7	88,5
Опірне кільце	6,2	35,1	9,6	53,9	6	33,5	8	45,2	6,1	34,2

Найбільш повно використані стержні в моделях №3 та 4.

Найменш раціонально попередньо прийняті перерізи для моделей №1 та 3.

З таблиці 1 також видно, що для всіх моделей прийнято занадто масивний профіль труби для опірної кільця, оскільки відсоток такого використання для всіх моделей становить 6-9,6%.

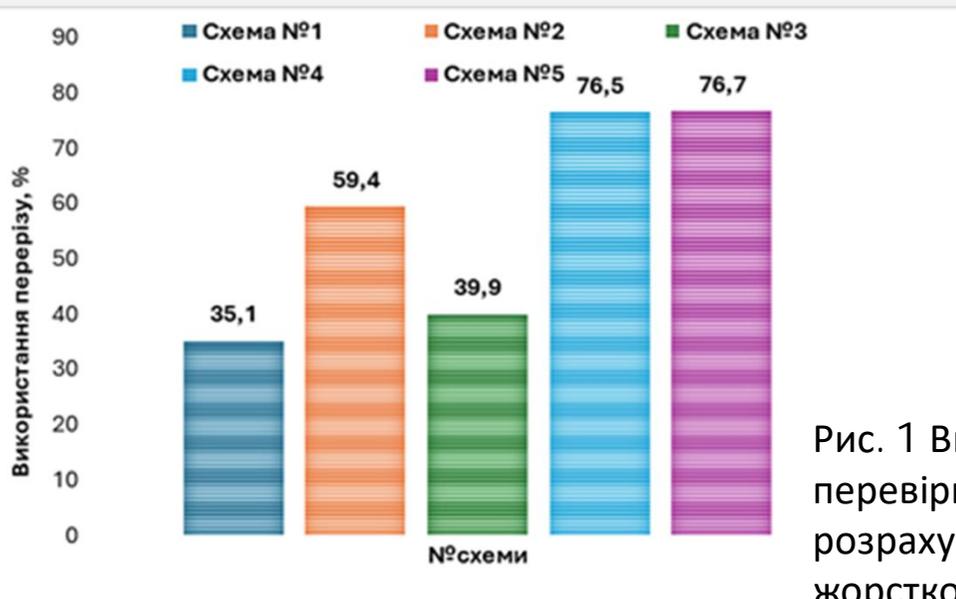


Рис. 1 Використання перерізу при перевірці за 1ГС при в результаті розрахунку з попередньо прийнятими жорсткостями (у %)

Підбір нових перерізів оболонки після 1-го ітераційного розрахунку в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР

Таблиця 1. Підбір елементів криволінійної поверхні куполу після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 102x4,5	С245	ТЕ 89x4	0.00838	677,13	5,67
2			ТЕ 89x4	0.00838	416,91	3,49
3			ТЕ 89x4	0.00838	802,72	6,73
4			ТЕ 89x4,5	0.00938	494,32	4,64
5			ТЕ 89x4,5	0.00938	520,8	4,89

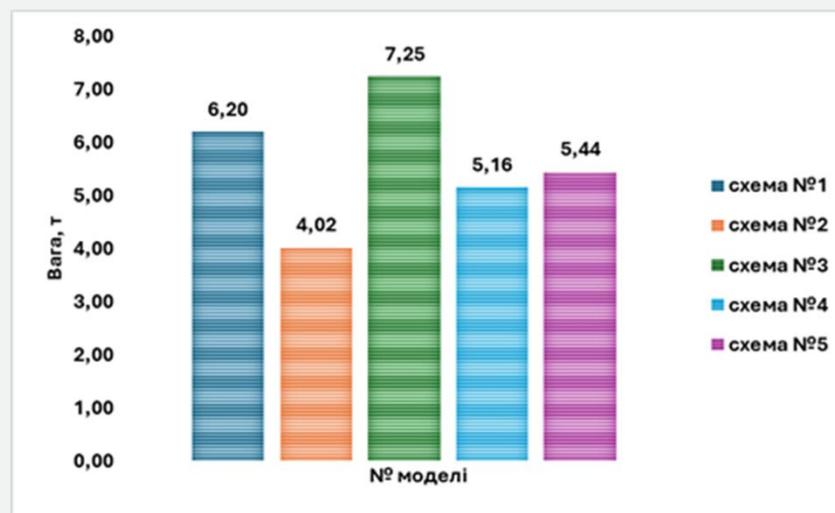
Таблиця 2. Підбір елементів опірною кільця після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 325x6	С245	ТЕ 89x4	0.00838	62,6	0,52
2			ТЕ 89x4	0.00838	62,4	0,52
3			ТЕ 89x4	0.00838	62,6	0,52
4			ТЕ 89x4	0.00838	62,4	0,52
5			ТЕ 89x4	0.00838	66,8	0,56

Таблиця 3. Вага моделей сітчастого куполу після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийняті перерізи для груп стержнів	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Загальна довжина стержнів куполу, м	Вага, т
1	ТБ 102x4,5 ТБ 325x6	С245	ТЕ 89x4, ТЕ 89x4	0.00838 0.00838	677,65	68,27
2			ТЕ 89x4 ТЕ 89x4	0.00838 0.00838	417,43	65,89
3			ТЕ 89x4 ТЕ 89x4	0.00838 0.00838	803,24	69,33
4			ТЕ 89x4,5 ТЕ 89x4	0.00938 0.00838	494,84	67,04
5			ТЕ 89x4,5 ТЕ 89x4	0.00938 0.00838	521,36	71,69

Рис. 1 Вага моделей сітчастих куполів, що досліджуються



ВИСНОВКИ

- 1. Створено скінченоелементні схеми деяких геодезичних куполів, що зустрічаються в практиці проектування. СЕ моделі відрізняються одна від одної лише одним параметром – частотою розбивки поверхні.
- 2. **Моделі (№№1-4) мають достатній запас стійкості.** Коефіцієнт запасу стійкості для цих моделей є більшим за 1. Але для моделі №5- стратодезичний купол $n=0,73 < 1$, **отже модель є нестійкою.** Найбільший й значний запас міцності ($n=11,26$) має модель геодезичного сферичного куполу з розбивкою «ікосаедр».
- 3. Розрахунок на стійкість споруд та будівель є обов'язковим пунктом при проектуванні споруди чи будівлі. Найчастіше саме втрата стійкості, найчастіше, є тим чинником, що призводить до руйнувань.
- Цю важливість показує розрахунок моделі №5, що може зруйнуватися не від руйнації перерізу елементів, а від втрати первісної форми стійкості положення. Тому для такої конструкції треба вжити заходів із її підсилення

- 4. Виконано аналіз напруженого стану сітчастих стержньових куполів. Стержні, які розташовуються в радіальному (за меридіональним напрямком) напрямі зазнають зусиль стиску. Проектування таких стержнів слід обов'язково виконувати із перевіркою згідно умов місцевої стійкості. Елементи, які розташовуються за кільцевим напрямом є зазнають зусиль розтягу.
- 5. Розрахункові моделі, де поздовжні зусилля стиску N в стержнях є найменшими, можна означити, як найбільш ефективну. Зусилля стиску мають найменші значення (рис.6.8) в сферичному куполі, із розбивкою поверхні за ікосаедрами (схема №1 ($N = -9,52$ т) та в геодезичному еліптичному куполі з розбивкою поверхні за ікосаедрами (схема №3) – $N = -13,5$ т. Отже може зробити висновок, що розбивка саме за ікосаедром поверхні куполу є найбільш ефективною. Якщо порівнювати форму твірної саме за такою розбивки, то раціональнішою формою є сферична поверхня, а не еліптична.

- 6. **Розбивка поверхні за октаедрами сприяє виникненню осьових зусиль майже в 2 рази більших, ніж при розбивці першого типу – за ікосаедрами.** При аналізі зусиль стиску в моделях з розбивкою за октаедрами (модель №2 та №4) теж ефективнішою з точки зору значення зусиль за модулем є модель №3 - із сферичною, а не еліптичною поверхнею.

7. Визначена ступінь використання (y %) перерізу елементів моделей (первісних жорсткостей), що попередньо прийняті до статичного розрахунку. Так, найменш раціонально використовуються елементи моделі №1 (це доводять й найменші з-поміж інших моделей) значення осьового зусилля $N = 35,1$ т. Тоді як в найбільш напружених моделях (№4 та №5) % використання перерізу за умовами першої групи граничних станів є найбільшими - 76,5 та 76,7% відповідно.

Отже, **найбільш раціональною за критерієм максимального % використання перерізу є схема №4.** (Схему №5 не розглядаємо, оскільки вона є нестійкою). Слід відзначити, що перевіз опірною кільця первісно був підібраний не раціонально (прийнято завищений

8. Слід відмітити, що саме в моделі №1 максимальні значення поздовжнього зусилля на стиск на розтяг є максимально близькими за значенням ($N_+ = 11,8$ т та $N_- = 9,52$ т). За критеріями розподілу зусиль в елементах модель №1 можна відзначити як найбільш ефективну та найбільш стійку.

9. За критеріями розподілу зусиль в елементах модель №1 можна відзначити як найбільш ефективну та найбільш стійку. Але за критерієм технологічності найбільш ефективною моделлю купол за схемою №1 не можна визначити, оскільки згідно його конструктивних особливостей буде присутньою найбільша кількість коннектів. Це значно збільшує вартість монтажу конструкції (велика частота розбивки його поверхні) та великі працевитрати під час зведення конструкції.

- Зважаючи на критерій ваги, **найлегшою конструкцією буде модель №2** геодезичного сферичного куполу з розбивкою за октаедрами.
- Хоча така модель не відрізняється найменшими показниками напруженого стану, але вирішальну роль в кінцевій вазі відіграє **саме частота розбивки поверхні, тобто загальна довжина стержнів**, що формують поверхню. Ця вага для моделі №2 є найменшою, що й обумовлює загальну найменшу її вагу з-поміж усіх інших моделей, що досліджувалися.

Дякую за увагу!