

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

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
Будівельних конструкцій

/...../

підпис

«__» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

**На тему: "Напружено-деформований стан циліндричної оболонки
в залежності від її висоти"**

Виконав (ла)

(підпис)

Марченко С.М.

(Прізвище, ініціали)

Група

(Науковий)

керівник

(підпис)

Срібняк Н.М.

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: будівельних конструкцій

Спеціальність: 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Марченко Сергій Миколайович

Тема роботи: Напружено-деформований стан циліндричної оболонки в залежності від її висоти

Затверджено наказом по університету № _____ від "___" _____ 2025 р.

Строк здачі студентом закінченої роботи: "___" _____ 2025 р.

Вихідні дані до роботи:

Об'ємо-планувальне та конструктивне рішення спортивної зали загальноосвітньої школи.

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

Виконати огляд джерел щодо особливостей роботи та проектування сітчастих оболонок. Створити СЕ моделі чотирьох структурних плит покриття, що мають один відмінний параметр-величину стріли підйому оболонки. Оцінити вплив величини стріли підйому на параметри НДС конструкції.. Підрахувати вагу моделей, що досліджуються, згідно прийнятих перерізів стержнів. 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)

. . Луцьковський

(Прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання:

Здобувач

(підпис)

С.М. Марченко

(Прізвище, ініціали)

Анотація

Марченко Сергій Миколайович. Напружено-деформований стан циліндричної оболонки в залежності від її висоти – Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

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 надають можливість за результатами числового експерименту за зміни лише одного критерію – величини стріли підйому циліндричної сітчастої оболонки покриття виявити напружено-деформований стан конструкції, її конструктивне вирішення й, врешт-решт матеріалоемність конструкції.

Аналіз публікацій та досліджень встановив, що вивчення факторів, що призводять до зміни (перерозподілу) зусиль в елементах сітчастої оболонки є актуальною та важливою задачею, оскільки така зміна дозволяє перерозподіляти осьові зусилля в конструктивних групах елементів циліндричної оболонки.

В основній частині наведено опис чотирьох скінченоелементних схем сітчастої сталеві злегшеної циліндричної оболонки покриття з розміром в плані 12,0x24,0 м. Оболонка має два дві торцеві діафрагми жорсткості у вигляді

плоских ферм з трубчатих елементів, бортових елементів, що сприймають зусилля розпору, що накопичуються в стержньовій конструкції стержньової поверхні. Конструкція спирається на колони в чотирьох кутах. Кожна з чотирьох моделей відрізняється одна від одної лише значенням стріли підйому ($f_1=1,2$ м; $f_2=1,4$ м; $f_3=1,5$ м; $f_4=1,6$ м), а решта геометричних та конструктивних параметрів залишаються незмінними.

В результаті статичного розрахунку порівняно показники напружено-деформованого стану чотирьох моделей.

За даними статичного розрахунку в модулі «Метал» згідно заданих параметрів конструювання за ДБН «Сталеві конструкції» прийнято нові профілі конструктивних груп стержнів конструкцій. За новими параметрами жорсткостей перерізів стержнів сітчастої циліндричної оболонки обчислено вагу кожної моделі.

У **висновках** встановлено, що зміна стріли підйому оболонки при незмінності решти геометричних та конструктивних параметрів оболонки значним чином впливає на перерозподіл та зміну зусиль в стержневих елементах конструкції. Зусилля розтягу-стиску виникають в усіх конструктивних групах елементах в схемі, що має найменше значення стріли підйому – 1,2 м (схема №1). Найбільші осьові зусилля виникають в конструктивних групах стержнів моделі №2 (стріла підйому становить 1,4 м). Найбільш стійкою конструкцією оболонка за схемою №2 також, найменш стійкою є модель №4 з найбільшою стрілою підйому -1,6 м. Статичний та конструктивний розрахунок виявили, що з-поміж моделей, що досліджувалися, найбільш ефективною за критерієм напружено-деформованого стану та ваги виявилася модель №1 зі стрілою підйому $f=(1/20) l$, тобто $f=1,2$ м.

Ключові слова: сітчаста оболонка, циліндрична оболонка, оболонка нульової Гаусової кривизни, стріла підйому, металеві конструкції, матеріалоемність

В додатках наведено; тези конференції, альбом слайдів мультимедійної презентації.

Структура роботи. Робота складається з основного тексту на 47 сторінках, у тому числі 22 таблиць, 40 рисунків. Текст роботи містить 6 розділів, що включають загальну характеристику роботи й висновки, список з 28 джерел, 1 додатку на 22 сторінках. Графічна частина складається з 22 слайдів мультимедійної презентації.

Abstract

Marchenko Serhii Mykolaiovych. Stress-strain state of a cylindrical shell depending on its height – Master's qualification work with manuscript rights.

Master's qualification work in specialty 192 "Construction and civil engineering". – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

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 **research results** make it possible, based on the results of a numerical experiment, to identify the stress-strain state of the structure, its design solution and, ultimately, the material consumption of the structure, by changing only one criterion - the value of the lifting boom of the cylindrical mesh shell of the coating.

The **analysis of publications** and studies has established that the study of factors leading to a change (redistribution) of forces in the elements of the mesh shell is an urgent and important task, since such a change allows redistributing axial forces in the structural groups of cylindrical shell elements.

The **main part** of the manuscript describes four finite element schemes of a mesh steel lightweight cylindrical cover with a plan dimension of 12.0x24.0 m. The shell has two end stiffening diaphragms in the form of flat trusses made of tubular elements, side elements that absorb the spreading forces accumulated in the core structure of the core surface. The structure is supported by columns in the four corners. Each of the four models differs from each other only in the value of the lifting boom ($f_1=1.2$ m; $f_2=1.4$ m; $f_3=1.5$ m; $f_4=1.6$ m), while the rest of the geometric and design parameters remain unchanged.

As a result of the static analysis, the stress-strain state of the four models was compared.

According to the static analysis in the 'Metal' module, new profiles of structural groups of structural rods were adopted in accordance with the specified design parameters according to the DBN 'Steel Structures'. The weight of each model was calculated according to the new parameters of the stiffnesses of the cross-sections of the rods of the mesh cylindrical shell.

The **conclusions** established that a change in the lifting boom of the shell with the rest of the geometric and structural parameters of the shell remaining unchanged significantly affects the redistribution and change of forces in the core structural elements. Tensile-compressive forces occur in all structural groups of elements in the

scheme with the smallest lifting boom value of 1.2 m (scheme No. 1). The largest axial forces occur in the structural groups of rods of model No. 2 (lifting arm is 1.4 m). The most stable shell structure according to scheme No. 2 is also the least stable, while model No. 4 with the largest lifting arm of 1.6 m is the least stable. The static and structural analyses revealed that among the studied models, the most efficient in terms of stress-strain state and weight was model No. 1 with a lifting boom $f=(1/20) l$, i.e. $f=1.2$ m.

Keywords: mesh shell, cylindrical shell, zero Gaussian curvature shell, lifting boom, metal structures, material consumption

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

Structure of work. The manuscript consists of the main text on 47 pages, including 22 tables and 40 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 22 pages. The graphic part consists of 22 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 сітчастих оболонок</i>	
<i>2.2 Геометрія циліндричних оболонок</i>	
<i>2.3 Дослідження ефективних форм оболонок</i>	
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	
РОЗДІЛ.4 ОБ'ЄМНО-ПЛАНУВАЛЬНЕ ТА КОНСТРУКТИВНЕ ВИРІШЕННЯ БУДІВЛІ	
<i>4.1 Об'ємно-планувальне вирішення будівлі</i>	
<i>4.2 Конструктивне рішення будівлі</i>	
РОЗДІЛ.5 МОДЕЛЮВАННЯ СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНИХ СХЕМ В РАМКАХ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ	
<i>5.1 Алгоритм здійснення числового дослідження в ПК ЛІРА-САПР</i>	
<i>5.2 Побудова скінченоелементної моделі сітчастої циліндричної оболонки</i> ...	
<i>5.2.1 Геометрія оболонки</i>	
<i>5.2.2 Побудова оболонки в середовищі ЛІР-ВІЗОР ПК «Ліра-САПР»</i>	
<i>5.2.3 Параметри жорсткості моделей, що досліджуються</i>	
<i>5.2.4 Граничні умови для конструкцій, що досліджуються</i>	
<i>5.2.5 Навантаження, що призначається</i>	
РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ	
<i>6.1 Аналіз деформованого стану моделей, що досліджуються</i>	
<i>6.2 Аналіз напруженого стану моделей, що досліджуються</i>	
<i>6.3 Аналіз стійкості моделей, що досліджуються</i>	
<i>6.4. Підбір нових перерізів оболонки після 1-го ітераційного розрахунку в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР</i>	

ВИСНОВКИ.....

Література.....

Додатки.....

Додаток 1. Графічний матеріал (презентація)

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

1.1 Актуальність теми

Циліндричні оболонки за конструктивним виконанням можна поділити на кілька типів:

- Одношарові оболонки з жорсткими несучими елементами, виготовленими з прокатних двотаврів. Такі оболонки зазвичай перекривають прольоти до 20 м. При додаванні діагональних елементів можливий незначний приріст прольоту. Основні несучі елементи можуть бути орієнтовані за двома або трьома напрямками;
- Сітчасті оболонки, що виконано двошаровими, мають значну жорсткість та можуть сягати прольоту 60,0 м й більше.

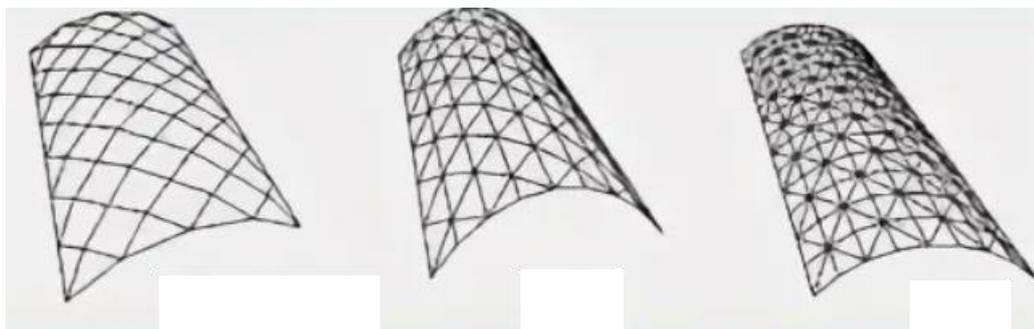


Рис.1.1 Схеми одношарових циліндричних оболонок

В цій роботі обрано фактор зміни такого геометричного параметри моделі оболонки як **стріла підйому**.

В нашому випадку для обрання в якості проектного рішення тієї чи іншої висоти оболонки немає ніяких конструктивних чи технологічних обмежень, тому слід, керуючись конструктивними рекомендаціями прийняти висоту стріли підйому в межах $(1/15 \dots 1/20)l$. Оскільки прольот конструкції становить 24,0 м, то висота стріли підйому передбачено буде знаходитись в межах 1,21,6 м.

Таким чином, проаналізувати та оцінити напружено-деформований стан моделей оболонки, що будуть мати різне значення стріли підйому, але в межах 1,21,6 м – є **актуальною задачею**.

Метою числового дослідження є встановлення напружено-деформованого стану в елементах моделей оболонки, що мають різне значення одного лише параметру- висоти стріл підйому. Напружено-деформований стан обумовлює конструктивне вирішення моделей, а значить й матеріалоемність.

Задачі, що поставлені для досягнення вказаної мети.

- 1) Дослідити характер та особливості роботи під навантаженням чотирьох моделей одношарової сітчастої циліндричної оболонки; виокремити параметри, які впливають на напружено-деформований стан конструкції;
- 2) прийняти чотири моделі циліндричної оболонки, стріла підйому яких варіюється в межах $(1/15..1/20)l$, тобто в межах 1,2...1,6 м. Від цього параметру від якого буде залежати напружено-деформований стан оболонки;
- 3) моделювання із застосуванням методу скінчених елементів , використовуючи ПК ЛІРА-САПР чотирьох скінченоелементних моделей одношарової циліндричної оболонки покриття, що відрізняються лише за одним критерієм – висотою стріли підйому конструкції;
- 4) задати при першій розрахунковій ітерації жорсткості для всіх конструктивних груп стержнів для чотирьох моделей оболонки, яка досліджується. Такі параметри жорсткості приймаються рівними;
- 5) виконати 1-й ітераційний статичний розрахунок, використавши первісно прийняті жорсткісні параметри елементів для всіх розрахункових схем одношарової оболонки;
- 6) за результатами даних статичного розрахунку в модулі «Лір-Візор» у модулі «Метал» призначити нові, запропоновані модулем, перерізи стержньових елементів всіх конструктивних груп стержнів оболонки;

7) обчислити згідно нових перерізів труб оболонок вагу кожної моделі циліндричної оболонки. Визначити розрахункову схему, яка би мала найменшу матеріалоемність;

8) зробити висновки з дослідження

Об'єкт дослідження – чотири моделі одношарової циліндричної оболонки покриття розміром в плані 12,0x24,0 м, що відрізняються одна від одної лише висотою стріли підйому конструкції ($f_1=1,2$ м, $f_2=1,4$ м, $f_3=1,5$ м, $f_4=1,6$ м).

Предметом дослідження є напружено-деформований стан моделей оболонки, що підлягають розрахунку, конструктивне вирішення цих моделей та їх матеріалоемність.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати числового експерименту дозволяють визначити з-поміж розрахункових схем оболонок, що досліджуються, найбільш ефективну за критерієм найменшої ваги (металоемності) модель.

РОЗДІЛ 2

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Історія розвитку сітчастих оболонок

Великопрольотні конструкції можуть виконуватись як у формі плоских систем (балкові, рамні та аркові покриття), так і у формі просторових систем (висячі, сітчасті, структурні та мембранні покриття). Просторові системи є більш ефективними порівняно з плоскими, оскільки вони краще використовують властивості сталі — забезпечують роботу переважно на розтяг і розподіляють зусилля у двох напрямках, що сприяє їх перерозподілу.

Під оболонкою (за визначенням В. Хенна в 1930 р.) розуміють трьохмірну конструкцію, що несе, та яка відрізняється просторовою

роботою і є такою, що складається із поверхонь одинарної чи подвійної кривини.

Ф. Дішингер в 40-х рр ХХ ст. дав таке визначення, що таке оболонка: «структура, форма якої представляє собою поверхню одинарної або подвійної Гаусової кривини, а товщина є досить незначною у порівнянні із габаритами самої поверхні». Окрім значної кількості оболонок із залізобетону, як монолітного, так і збірного (рис. 2.1), в практиці проектування значну частку таких конструкцій займають **сітчасті оболонки**.



Рис.2.1 Термінал TWA в аеропорту Кеннеді в Нью-Йорку, 1962

Стержньові сталеві оболонки беруть свій початок з 19 ст. Тоді почали застосовуватися **легкі стержньові структури**. Вони призначалися для улаштування куполів та склепінь, замінюючи при цьому традиційні масивні кам'яні конструкції.

Ще в ХІХ ст. застосовувалися **легкі стержньові структури** для влаштування склепінь та куполів, замінюючи ними традиційні масивні кам'яні конструкції.

Автором цього класу конструкцій вважають інженера, винахідника й ученого В.Г. Шухова [15]. В.Г. Шухов першим у світі використав сталеві сітчасті оболонки для зведення будівель і веж; запровадив у архітектуру

форму однопорожнинного гіперболоїда обертання, створивши перші гіперболоїдні конструкції.

Сітчаста оболонка (рис.2.2) — це будівельна конструкція, що несе навантаження, й яка набула значного поширення в сучасній архітектурі ХХІ століття. Застосовуються в практиці проектування сітчасті перекриття-оболонки, оболонки для веж та складні аморфні сітчасті конструкції. Сітчасті оболонки виготовляються зі сталі, композитних матеріалів та деревини.

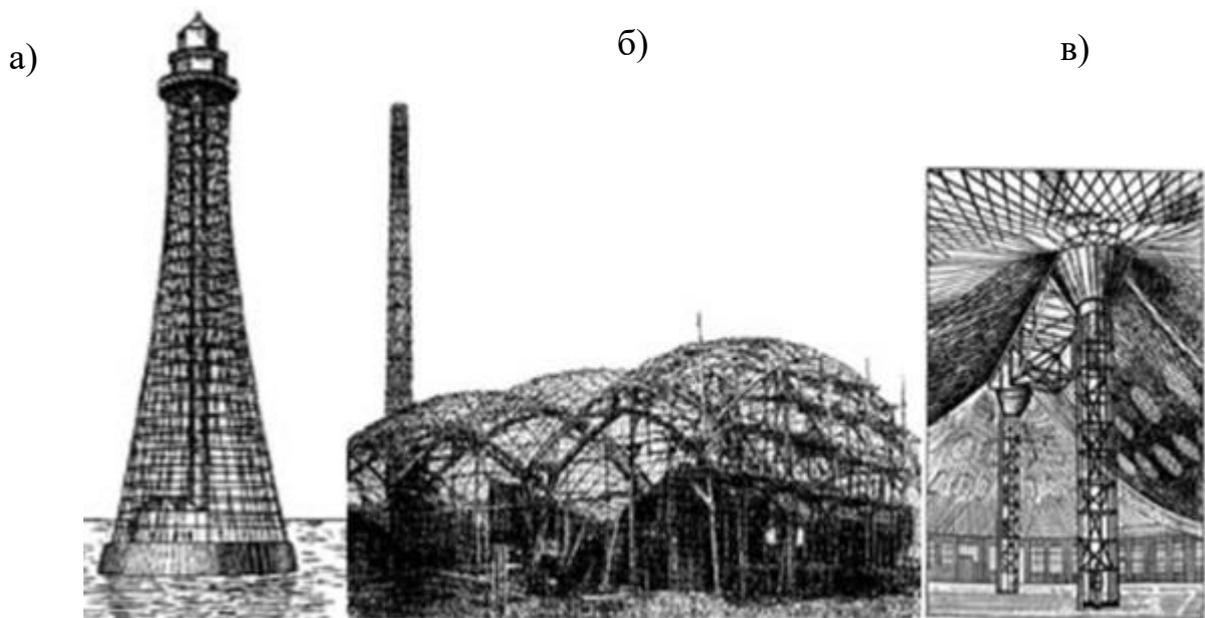


Рис. 2.2 Приклади сітчастих конструкцій авторства В.Г. Шухова: гіперболоїдна сітчаста вежа-а; перекриття Віксунського заводу сітчастою оболонкою типу еліптичний параболоїд (1897 р.)-б; шатрові навіси Нижегородської виставки (1896 р.)-в

Значний вклад у впровадження несучих сітчастих оболонок до архітектури світу внесли знамениті архітектори Бакмінстер Фуллер, Норман Фостер, Френк Гері, Ніколас Гримшоу, Сантьяго Калатрава.

До середини ХХ століття несучі сітчасті оболонки застосовувалися рідко через складність їх розрахунку, високі вимоги до якості матеріалів та технологічні особливості монтажу. Повноцінне визнання та широке використання в сучасній архітектурі сітчасті оболонки отримали лише в останні два десятиліття завдяки впровадженню комп'ютерних технологій

для розрахунків конструкцій, а також появи нових матеріалів й будівельних технологій.

У XXI ст. сітчасті оболонки стали одним із ключових інструментів формоутворення в авангардній архітектурі, включаючи хмарочоси та об'єкти стилю «хай-тек» (рис.2.3). Сьогодні сітчасті несучі оболонки поступово замінюють залізобетонні несучі оболонки у будівельній практиці.



Рис. 2.3 Приклади сучасних сітчастих оболонок в стилі Ні-Теш

2.2 Геометрія циліндричних оболонок

Оболонки циліндричного типу характеризуються серединною поверхнею, що утворена ковзанням плоскої кривої (твірної) по двом паралельним направляючим, що є прямими лініями.

Оскільки в формоутворенні циліндричної поверхні приймають участь і прямі лінії й крива, то така поверхня має кривину лише в одному напрямку – в напрямку переносу плоскої кривої.

Добуток кривизни твірної на нуль (оскільки в іншому напрямку в кожній точці поверхні кривина відсутня) дає нульове значення. Таким чином циліндричні поверхні також називають поверхнями нульової Гаусової кривини.

Обрис криволінійної твірної приймають за параболою чи колу, а рідше - за еліпсом або іншою математичною кривою високих порядків. Як правило, виготовляються такі оболонки із залізобетону або в сітчастому стержньовому варіанті. Також в металевому варіанті оболонки можуть бути виконані як складки.

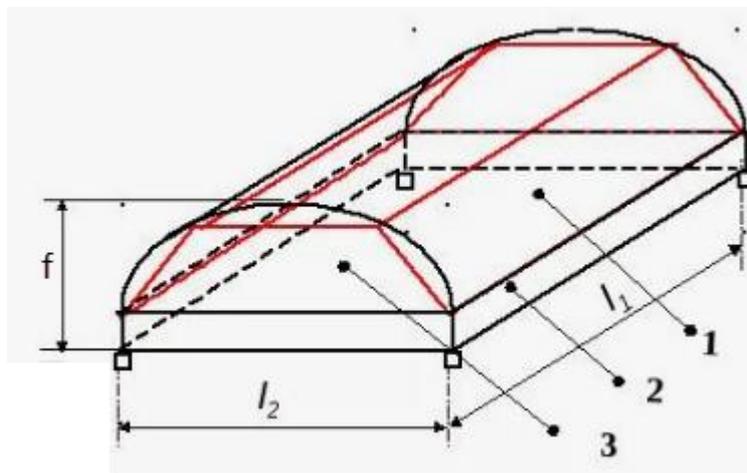


Рис. 2.1 Елементи циліндричної оболонки: 1-оболонка (шкаралупа); 2- бортовий елемент; 3- торцева діафрагма жорсткості

Якщо $l_1/l_2 > 1$, то оболонку вважають довгою, якщо $l_1/l_2 \leq 1$, то її вважають короткою. Якщо до криволінійної площини вписати багатогранну призму, то таку оболонку називають призматичною.

Найбільш вживаним та простим є круговий обрис твірної для збірної циліндричної оболонки. Здебільшого поверхню оболонки окреслюють за круговим циліндром.

Призматичні складки за типом коротких циліндричних оболонок мають відмінність від циліндричних поверхонь оболонок в тому, що у них замість кривої-твірної присутня ламана пряма. Складка може бути перетворена перетворюється до оболонки під час зменшення довжини прямолінійних ділянок твірної й збільшення їх кількості (рис.2.2). Віддаль між опорами оболонки чи складки вздовж прямої направляючої називають прольотом L_1 , а віддаль між поздовжніми краями – L_2 або, інакше, довжиною хвилі чи шириною оболонки (складки).

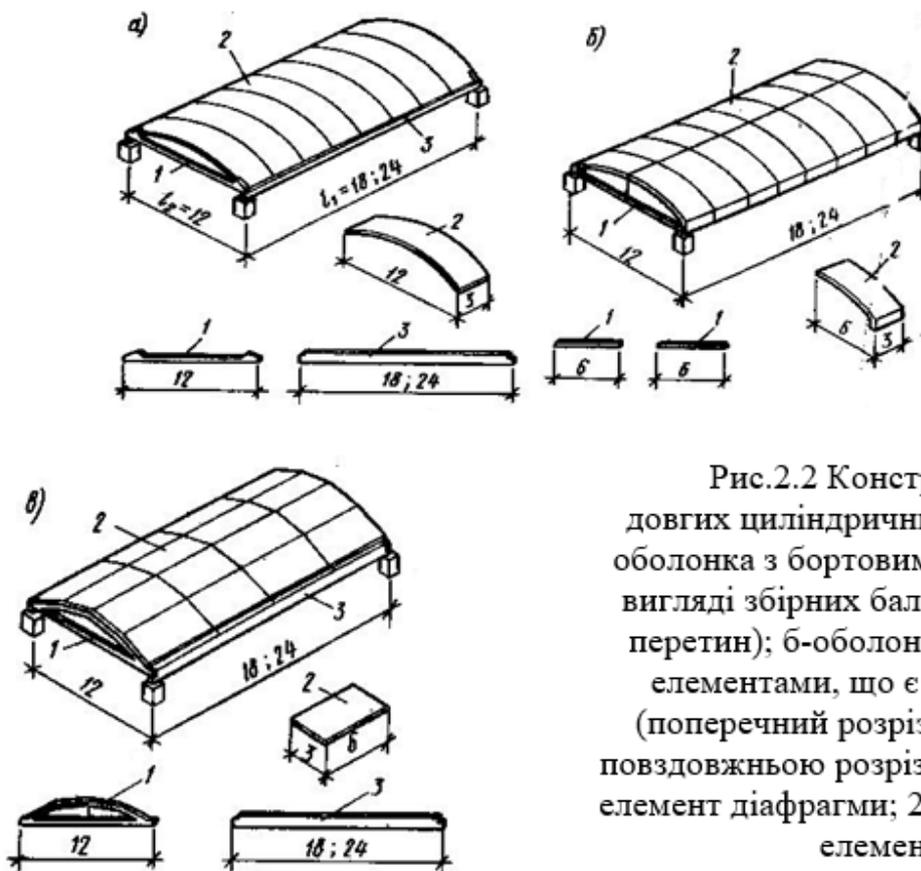


Рис.2.2 Конструктивні форми довгих циліндричних оболонок: а-оболонка з бортовими елементами в вигляді збірних балок (поперечний перетин); б-оболонка з бортовими елементами, що є частиною плит (поперечний розріз); в-оболонка з поздовжньою розрізкою на плити; 1-елемент діафрагми; 2-плити; 3-бортові елементи

Оболонки циліндричного типу спираються на колони (стійки) через торцеві плоскі діафрагми. Діафрагми є досить жорсткими у своїй площині та являють собою плоскі ферми або арки. Бортові елементи – балочні елементи, що дорівнюють прольоту оболонки й сприймають розпір, що

виникає в тілі криволінійної оболонки від зовнішнього навантаження. Також ці елементи понижують деформативність зовнішніх зон криволінійної плити оболонки. В бортових елементах розміщують поздовжню арматуру, що сприймає розтяг.

Деякі приклади можливих геометричних та конструктивних вирішень сітчастих циліндричних оболонок наведено на рис.2.3

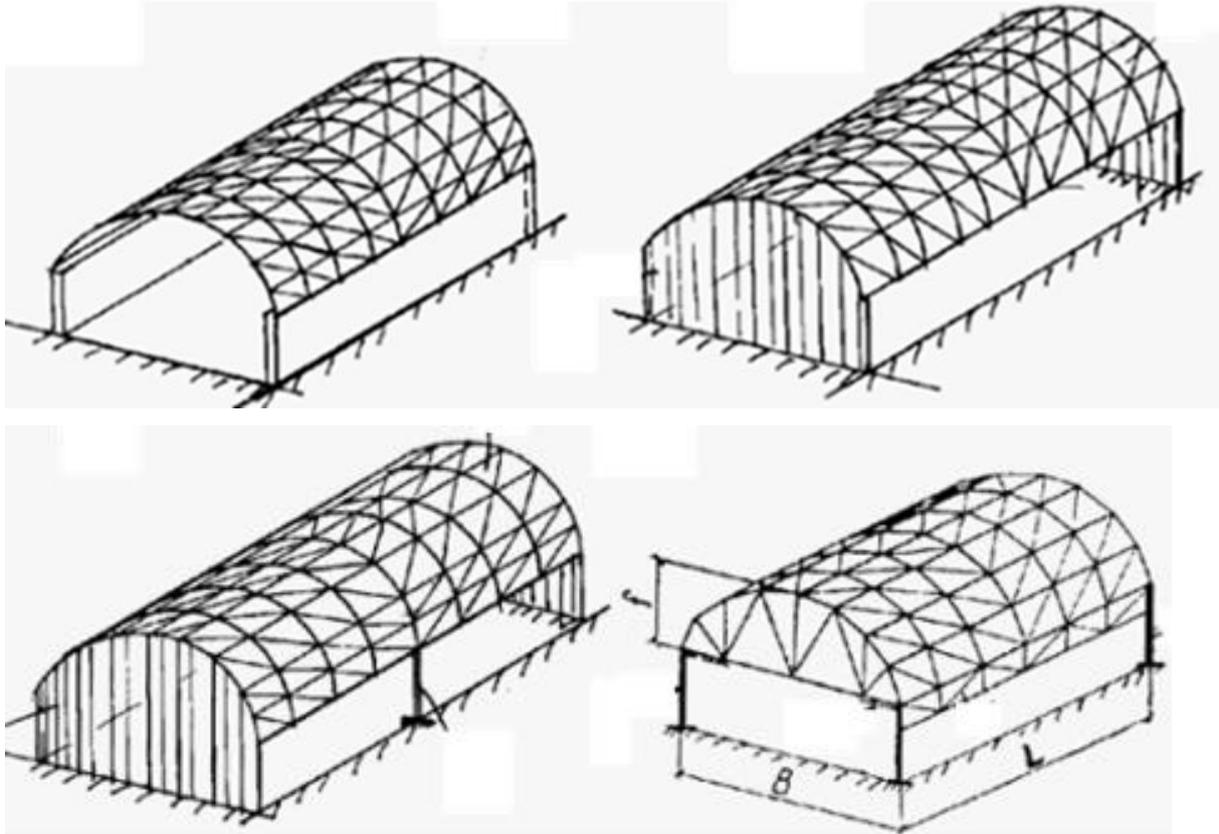


Рис. 2.3 Приклади можливих геометричних та конструктивних вирішень сітчастих циліндричних оболонок

2.3 Дослідження ефективних форм оболонок

Вибір оптимальної форми ґраток для сітчастої конструкції є важливою задачею оптимізації. Наразі із використанням числового моделювання багато програмних комплексів мають можливості не лише для розрахунку конструкції, але мають потужні інструменти для пошуку її оптимального варіанту. Оптимізаційні розрахунки дозволяють не лише визначити майбутні

характеристики конструкції, але й реалізувати його точну розрахункову модель. При цьому можуть бути використані різні набори алгоритмів щодо оптимізації. Розрахункові комплекси можуть включати в себе спеціальні оптимізаційні модулі, що базуються на одному чи декількох математичних методах.

Процес оптимізації форми [4-14] є кардинально важливим підходом до проектування оболонок, зокрема сітчастої конструкції.

Безпосередньо метою досліджень є і сам процес оптимізації форми поверхні. Так, ПК Comsol Multiphysics [16] реалізують оптимізаційні алгоритми. Можна виділити наступні три методи оптимізації: ММА [17], SNOPT [18] та IPOPT [19]. При цьому мається на меті побудова розбивочних скінченоелементних сіток для розрахунків за двома типами розмірів - більш дрібний та дрібний. За результатами розрахунку аналізується ефективність кожного оптимізаційного методу й найбільш ефективного проектного рішення для кожної моделі оболонки, що досліджується.

Так, величина елементів сітки, що повторюються (мультиплікуються) та її форма ґраток впливають на концентрацію та перерозподіл осьових зусиль в стержньових елементах, що формують криволінійну поверхню оболонки. Дослідження в майбутньому за цими двома параметрами ефективних конструктивних рішень сітчастих оболонок є перспективним напрямком досліджень.

Експериментальними дослідженнями роботи під навантаженням та руйнуванням одношарових циліндричних сітчастих оболонок займалися Nie G, Zhang C, Zhi X and Dai J [21]. Результати експериментальних та числових дослідження механізму нестійкості та опору навантаженню ромбічних сітчастих гіперболоїдно-ґратчастих оболонок при вертикальному навантаженні наведено в роботі Guo Y-L, Zhang Y-H, Zhu B-L, Zhou P та Pi Y-L [22].

Поєднаний підхід до пошуку форми та оптимізації сітки для одношарових сітчастих оболонок наведено у [23].

Дослідження фомотворення стійкості циліндричної сітчастої оболонки, що підкріплена одношаровими гратчастими мембранними оболонковими підструктурами, наведено в [24].

В [25] розглянуто питання практична генерація сітки криволінійної поверхні та процедура проектування конструкцій вільної форми за допомогою математичного моделювання.

Питання оптимізації поперечного перерізу активно зігнутих сітчастих оболонок з обмеженнями на міцність і геометричну сумісність розглянуто в [26]. Дослідження параметризації форми для структурної оптимізації оболонкових конструкцій наведено в [27].

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи, які застосовано в дослідженні, сформульовані виходячи мети та задач дослідження.

Метод 1. Метод аналізу.

- 1) Оцінювання даних про сталеві сітчасті оболонки, їхню роботу під навантаженням та стійкість криволінійних поверхонь; аналіз рекомендацій щодо вибору оптимальних параметрів розрахунку; дослідження параметрів, що впливають на зміну та перерозподіл зусиль у конструктивних елементах.

2) Метод 2. Метод скінчених елементів у механіці будівельних конструкцій

Метод скінчених елементів (МСЕ) — це ефективний інструмент (математичний метод) для числового розв'язання складних задач у механіці будконструкцій зокрема. Сьогодні він широко застосовується для аналізу складних як статично визначуваних, так і статично невизначуваних систем. У МСЕ структурна модель являє собою набір

скінченних елементів, які пов'язані між собою в вузлах — дискретних точках. Елементи скінченної довжини можуть мати різні фізичні характеристики, такі як товщина, коефіцієнт теплового розширення, щільність, модуль Юнга, модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона.

В дослідження метод використовується для визначення як напружено-деформованого стану циліндричних сітчастих оболонок, так і для визначення параметрів стійкості.

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

Основні принципи вибору перерізів стержнів сітчастих оболонок полягають у відповідності до вимог та рекомендацій норм проектування сталевих конструкцій [2].

Вибір перерізів розтягнутих стержнів здійснюється за такою послідовністю: спочатку визначають необхідну площу поперечного перерізу стержня за формулою (3.1).

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

Після цього за сортаментом підбирають відповідний переріз і визначають його геометричні характеристики.

Перерізи стиснутих стержнів знаходять за формулою, що визначає необхідну площу стержня, що зазнає центрального стиску:

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

Ця нормативна методика реалізована в модулі (постпроцесорі) «Метал» ПК Ліра-САПР. Тому процес підбору перерізів (профілів елементів) відбувається автоматизовано з перевіркою при підборі виконання умов міцності, стійкості та жорсткості (вимог розрахунків за 1-ю та 2-ю групами граничних станів).

4) Аналitична обробка результатів розрахунку [2]

Аналіз та обробка результатів розрахунків відбувається із використанням програмного забезпечення Microsoft Excel (рис.3.1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
4				Таблиця 1. Вага верхнього поясу діафрагми жорсткості								Таблиця 1. Вага верхнього поясу						
5																		
6				Профіль	№ типу жорсткості	Вага 1 м.п. (т)	Загальна довжина елементів, (м)	Вага загальна, (т)			Профіль	№ типу жорсткості	Вага 1 м.п. в, (т)	Загальна довжина елементів, (м)	Вага загальна, (т)			
7				76*10		0,01627	11,686	0,19013122			121*8	1	0,020985	12,436	0,260963			
8								0,19							0,26			
9																		
10																		
11				Таблиця 2. Вага нижнього поясу діафрагми жорсткості								Таблиця 2. Вага нижнього поясу діафрагми жорсткості						
12																		
13				146*5		0,0173793	12	0,2085516			159*6		0,02263	12	0,27156			
14								0,21							0,27			
15																		
16																		

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

РОЗДІЛ 4

ОБ'ЄМНО-ПЛАНУВАЛЬНЕ ТА КОНСТРУКТИВНЕ ВИРІШЕННЯ БУДІВЛІ

4.1 Об'ємно-планувальне вирішення будівлі

Проект загальноосвітньої школи в м. Суми на 650 учнів має складну конфігурацію у плані. На рис. 4.1 представлено план будівлі школи, розрахованої на 650 учнів. Покриття у вигляді сітчастої циліндричної оболонки, що аналізується, запроєктоване над спортивною залою з розмірами 12,0 x 24 м у плані. Зала розташована між осями Е-Ж та 1-4.

Висота спортивної зали до нижнього рівня торцевої діафрагми жорсткості становить 7,2 м.

Будівля має три поверхи, загальна висота складає 11,2 м, а висота кожного типового поверху дорівнює 3,3 м.

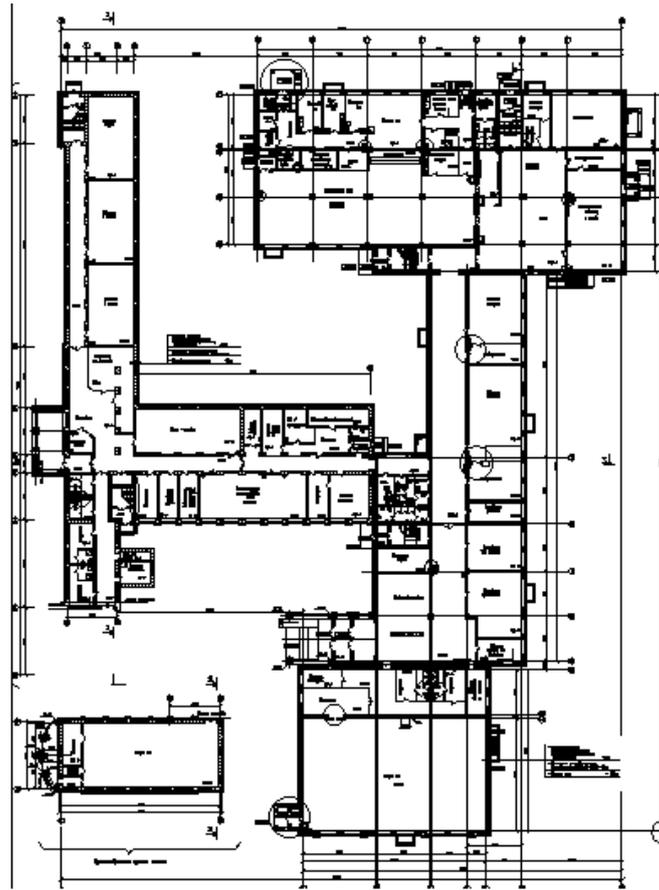


Рис.4.1 План будівлі на відм. 0,000

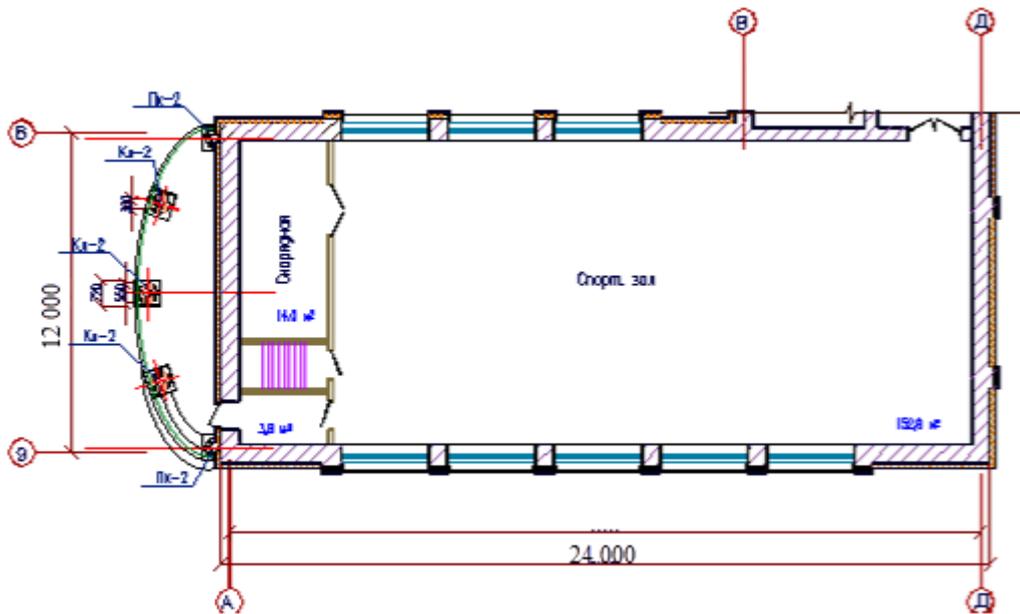


Рис. 4.2 План спортивної зали на відм.0,000 в осях А-Д та 9-В

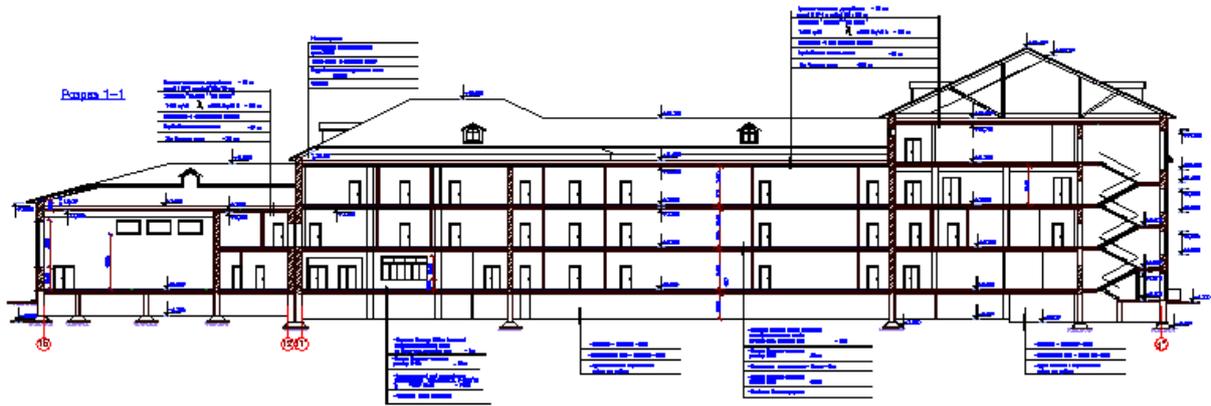


Рис. 4.3 Розріз 1-1 будівлі

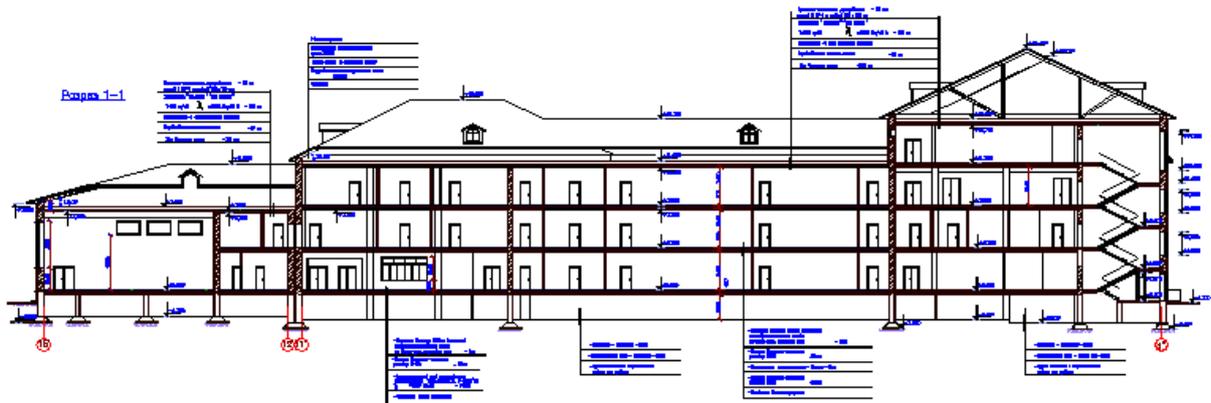


Рис. 4.4 Розріз 2-2 будівлі

4.2 Конструктивне рішення будівлі

Будівля запроектована безкаркасною з несучими стінами із цегли. Товщина зовнішніх стін прийнята товщиною 510 мм. Типові поверхні перекрито збірними залізобетонними багатопорожнистими плитами.

Фундаменти вирішено як збірні стрічкового типу та складаються із збірних блоків та збірних плит. Для будівлі в цілому прийнято систему похилих дерев'яних крокв й передбачено технічне горище.

В якості покриття спортивної зали, що стоїть як окрема будівля, прийнято сітчасту оболонку за обрисом циліндра та має розміри в плані 12,0x24,0 м.

Це конструктивне вирішення покриття дозволяє перекрити значний проліт спортивної зали в 24,0 м без застосування проміжних опор. Циліндрична сітчаста оболонка спирається на чотири колони, що розташовані в кутах конструкції.

Традиційно простір 12,0x24,0 м перекривався залізобетонними крокв'яними балками чи фермами з прольотом 12,0. По балкам (фермам) влаштовувалися збірні залізобетонні ребристі панелі покриття (як правило, розміром 1,5x6,0 м або 3,0x6,0 м).

Залізобетонні збірні плитні конструкції набули актуальності актуальними в період масового будівництва – (70-80-х рр. ХХ ст.) й завдячуючи, у тому числі досить розвинутій базі, з виробництва збірного залізобетону. Але легкі сітчасті циліндричні оболонки покриття нині виступають гарною альтернативою масивним й важким залізобетонним несучим конструкціям покриття. Сітчасті циліндричні оболонки покриття можуть застосовуватися при реконструкції будівель громадського призначення, й, зокрема, навчальних закладів середньої освіти.

РОЗДІЛ 5

МОДЕЛЮВАННЯ СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНИХ СХЕМ В РАМКАХ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

5.1 Алгоритм здійснення числового дослідження в ПК ЛІРА-САПР

На рис.5.1 приведено алгоритм виконання числового експерименту.

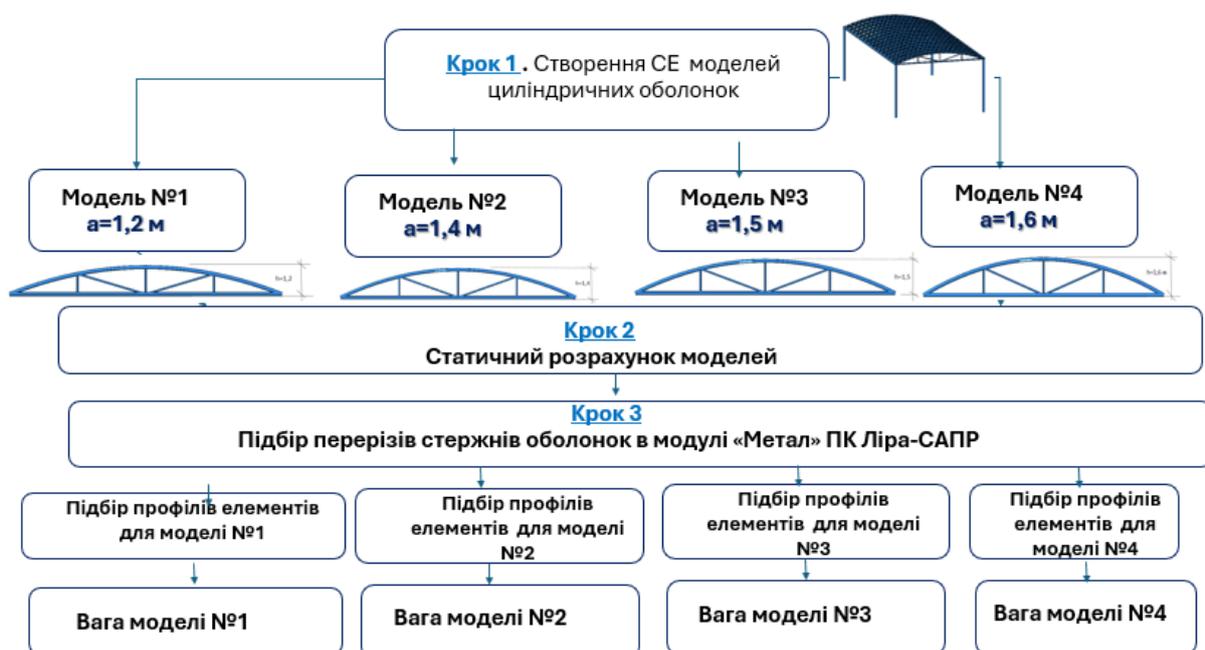


Рис. 5.1 Алгоритм виконання числового експерименту в межах дослідження

В рамках проведення досліджень числовим методом передбачається здійсним такі кроки:

- В середовищі ПК Ліра-САПР створити чотири скінчено-елементні розрахункові схеми циліндричної сітчастої оболонки, що має розміри в плані 12х24 м. Геометричні параметри схем є ідентичними. Відмінність полягає в тому, що у кожній моделі стріла підйому є різною.

-Висота стріли підйому варіюється в межах $(1/15...1/20)l$. Таким чином прийнято моделі з такими значеннями стріли підйому:

- $(1/20) l = 24,0/20 = 1,2$ м (схема №1);
- $(1/20) l = 24,0/17 = 1,4$ м (схема №2);
- $(1/20) l = 24,0/16 = 1,5$ м (схема №3);
- $(1/15) l = 24,0/15 = 1,6$ м (схема №4);

- криволінійна циліндрична сітчаста поверхня оболонки спирається на колони в чотирьох кутових точках. Колони мають однакову висоту -7,2 м та мають однакові граничні умови (заборона лінійних переміщень опорних вузлів вздовж осей X, Y, Z).

- У розрахункових моделях виділено наступні групи конструктивних елементів (стержнів):

- **стержні верхнього поясу** торцевих діафрагм жорсткості, що являють собою плоскі ферми із трубчатих стержньових елементів;
- **стержні нижнього поясу** торцевих діафрагм жорсткості, що являють собою плоскі ферми із трубчатих стержньових елементів;
- **стержні решітки** торцевих діафрагм жорсткості, що являють собою плоскі ферми із трубчатих стержньових елементів;
- **бортові елементи**, що спримають горизонтальний розпір, що виникає в стержнях, які формують криволінійну поверхню оболонки;

- стержні, що безпосередньо утворюють криволінійну поверхню оболонки (т. зв. **стержні поверхні оболонки**);
 - колони
- В подальшому аналізувати напружено-деформований стан й виконувати конструктивні розрахунки будемо саме оперуючи цими групами стержнів.
- В рамках першого етапу розрахунку прийнятими конструктивними групами елементів було призначено **однакові** профілі стержнів із труб за згідно з [1] табл. 4.2).
- Статичний розрахунок для прийнятих моделей виконано з такими елементами:
- прийнята методика розрахунку – Розрахунок за сполученням навантажень;
 - передбачено розрахунок на стійкість оболонок покриття за РСН за всіма прийняти завантаженнями (рис. 4.2).

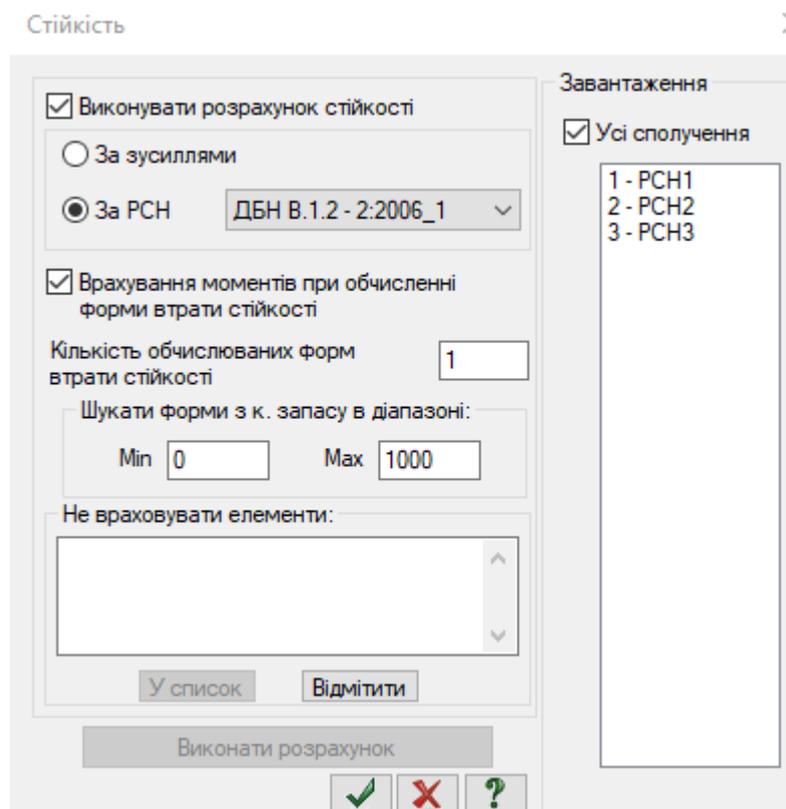


Рис.5.2 Діалогове вікно завдання параметрів розрахунку конструкції на стійкість в ПК Ліра-САПР

- виконати аналіз деформацій вузлів поля оболонки та зусиль, що виникають в стержньових елементах скінченоелементної схеми;
- За результатами 1-ї статичної ітерації в модулі (постпроцесорі) «Метал» підібрати нові профілі стержньових елементів згідно норм [2] та за умов виконання вимог 1-ї та 2-ї груп граничних станів конструкції.
- Виконати підрахунок ваги конструктивних груп стержнів, що прийнято та підрахунок загальної ваги моделей.

- 5.2 Побудова скінченоелементної моделі сітчастої циліндричної оболонки

5.2.1 Геометрія оболонки

Як конструкції, що підлягають дослідженню, розглянуто чотири моделі оболонки покриття за поверхнею нульової гаусової кривини – циліндричної оболонки (рис. 5.3).

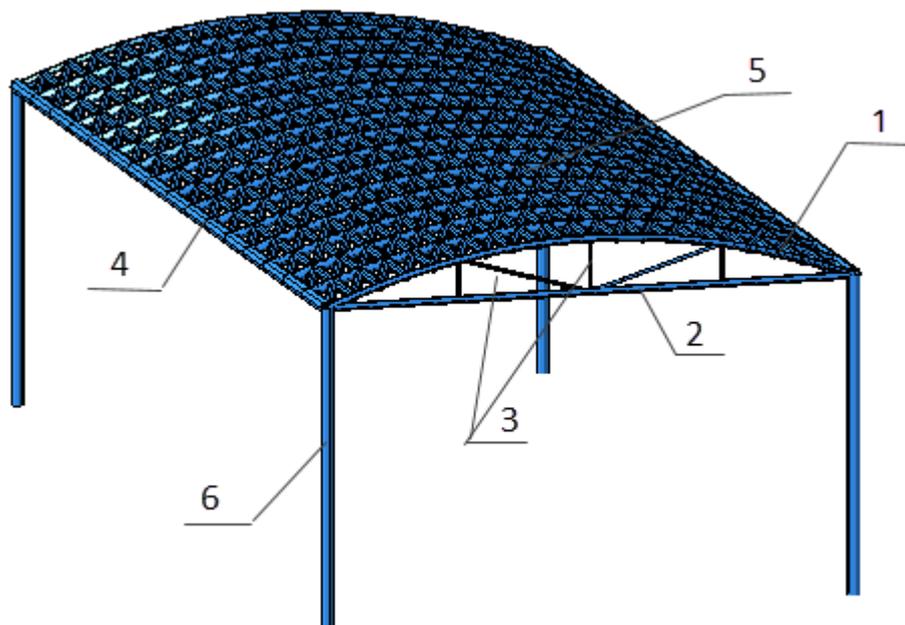


Рис. 5.3 Просторова модель циліндричної оболонки покриття (на прикладі моделі №1, $h=1,2$ м): стержні верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості -1; стержні нижнього поясу торцевої діафрагми жорсткості -2 ; стержні решітки торцевої діафрагми жорсткості-3; бортові елементи-4; стержні поля (поверхні) оболонки -5; колони -6

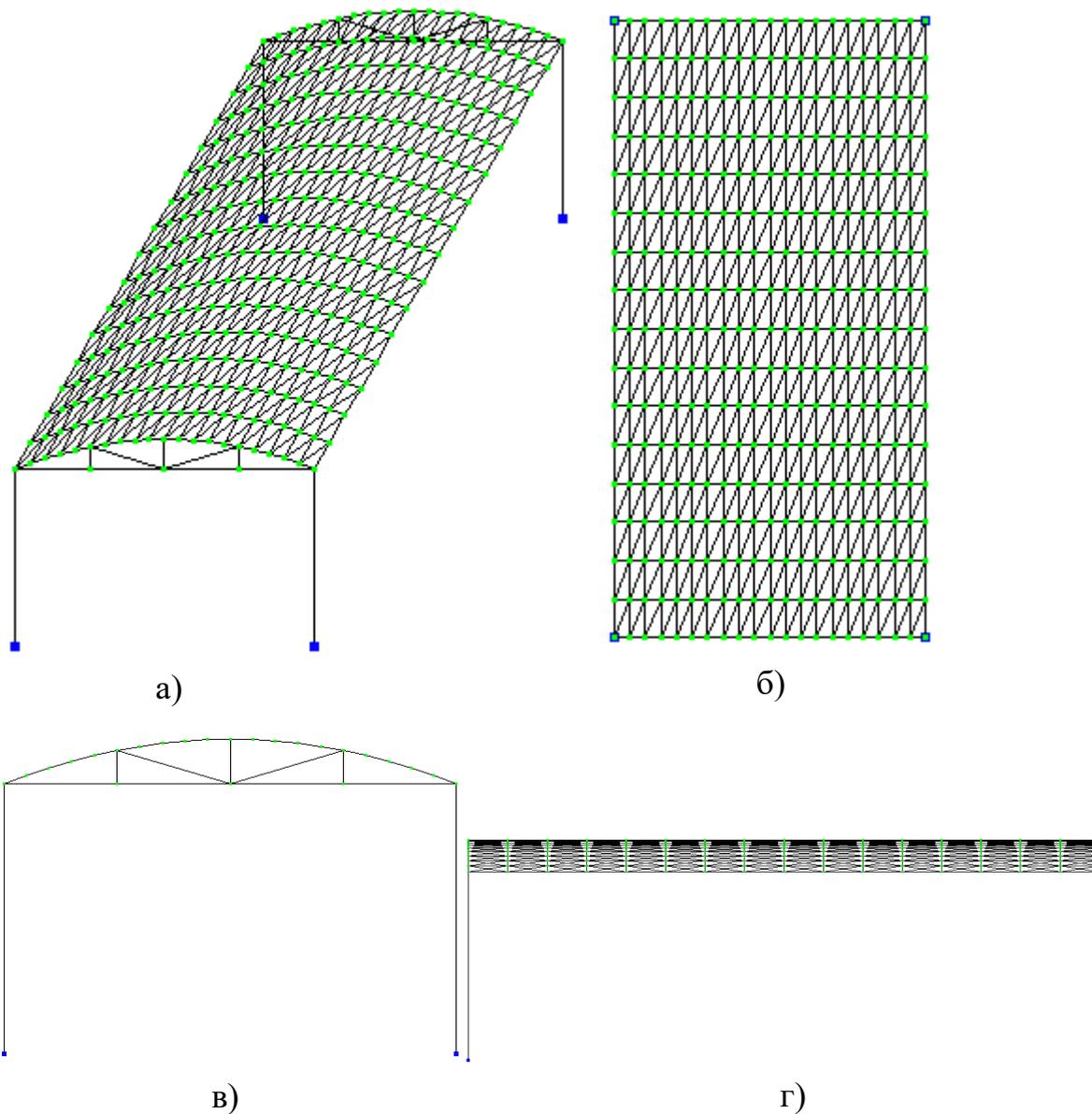
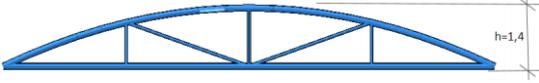


Рис. 5.4 Скінченоелемента схема (на прикладі моделі №1, $h=1,2$ м):
 аксонометрична модель-а; вид в площині XOY -б; вид в площині XOZ -в;
 вид в площині YOZ -г;

В таблиці 5.1 наведено геометричні характеристики моделей циліндричної оболонки, що досліджуються.

Таблиця 5.1. Геометричні характеристики моделей циліндричної оболонки, що досліджуються

№ моделі	Розміри в плані оболонки, $b \times l$, м	Висота оболонки (стріла підйому), м	Формула плоскої твірної в площині XOZ	Вид оболонки в площині XOZ
1	12x24	1,2	$z = -3 \frac{x^2}{9,5^2}$	
2		1,4	$z = -3 \frac{x^2}{8,7^2}$	
3		1,5	$z = -3 \frac{x^2}{8,5^2}$	
4		1,6	$z = -3 \frac{x^2}{8,2^2}$	

5.2.2 Побудова оболонки в середовищі ЛІР-ВІЗОР ПК «Ліра-САІР»

Розрахункова схема оболонки типу циліндр (рис.5.4,а) змодельована стержньовий скінченим елементом №10 – «універсальний просторовий стержень».

Твірною криволінійної поверхні в напрямку осі Y є крива, що математично описується параболою. Формули параболи для моделей, що досліджуються, наведено в таблиці 5.1. Парабола створюється в площині XOZ способом формульного введення рівняння параболи (рис.5.5,а), а далі способом переносу транслюється вздовж осі Y на довжину 24,0 м (рис.5.4,б).

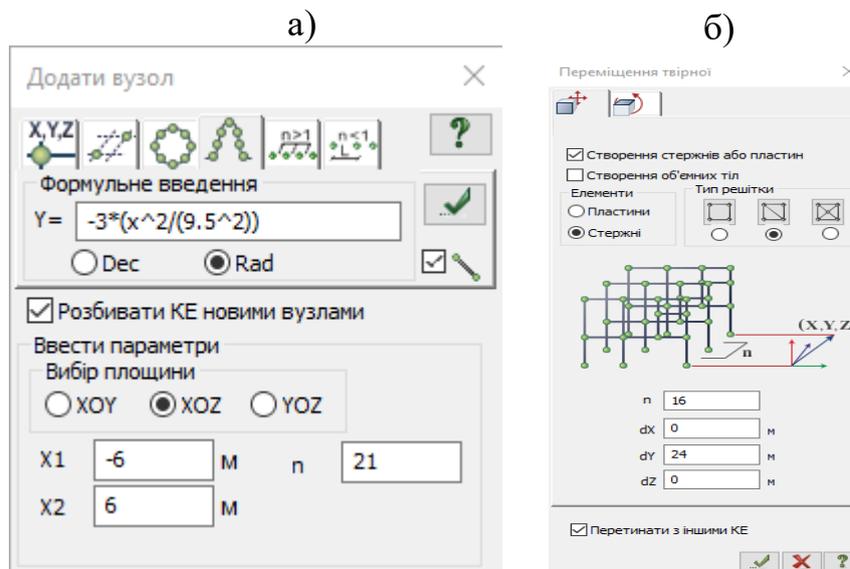


Рис. 5.5 Діалогові вікна для створення циліндричної оболонки: вікно для формульного завдання плоскої параболи (для схеми №1 ($h=1,2$ м)) – а; вікно для завдання параметрів переносу плоскої твірної вздовж направляючих – б

Конструктивні елементи такі як торцеві діафрагми жорсткості являють собою плоскі ферми, змодельовані за допомогою скінченного елемента №10.

Бортові елементи, що розташовані в крайніх зонах криволінійної поверхні також змодельовано за допомогою СЕ №10.

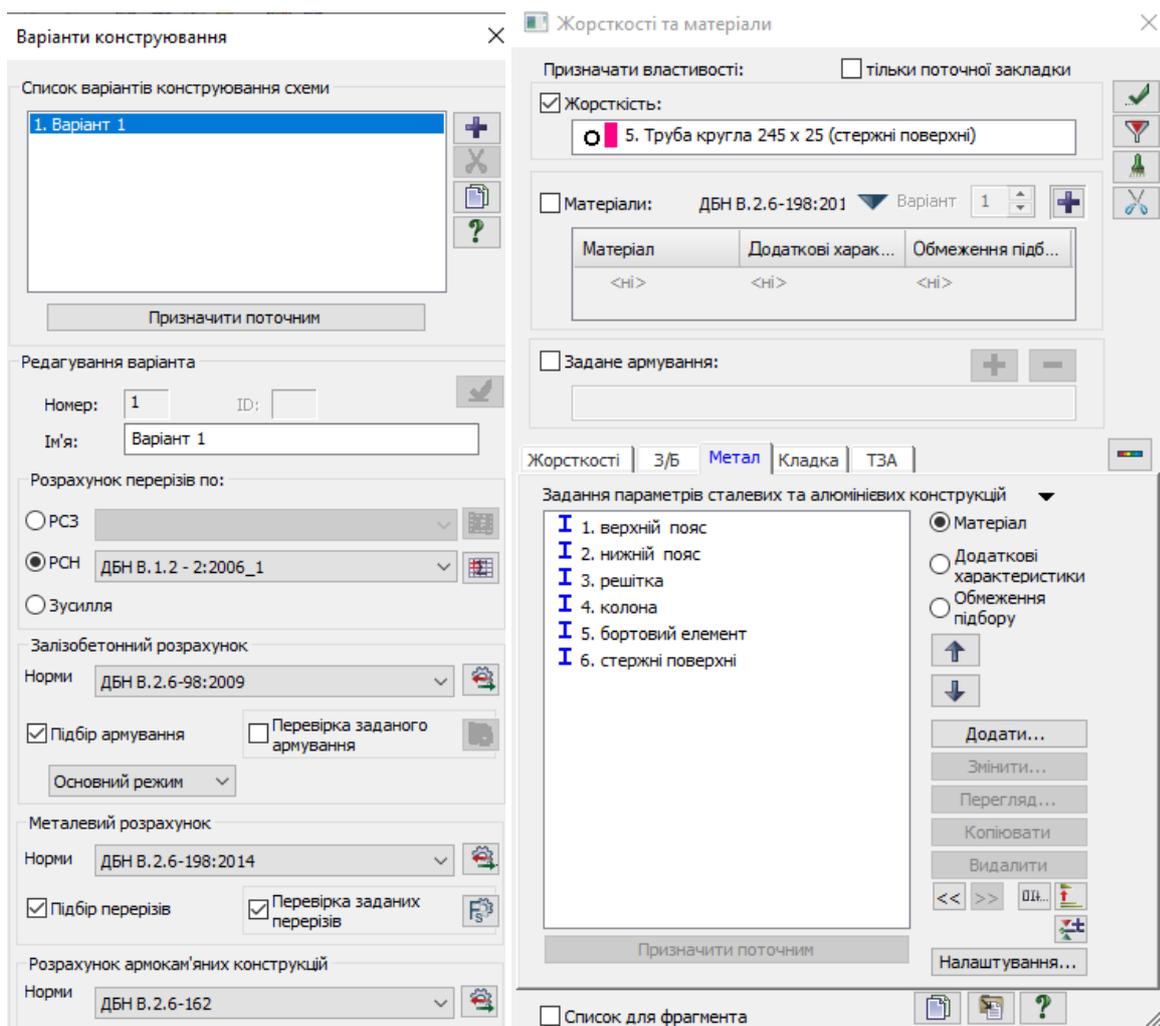
5.2.3 Параметри жорсткості моделей, що досліджуються

Попередньо, перед першою ітерацією, приймемо параметри жорсткості для конструктивних груп стержнів циліндричних оболонок. Всі стержньові елементи моделей прийнято із сталі С235. Характеристики жорсткості наведено в таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Характеристики жорсткостей конструктивних елементів
структурного покриття (при ітераційному розрахунку №1)

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м ²	R, т/м ³	μ	Сталь С235	q, т/м
1.Стержні верхнього поясу діафрагми жорсткості	Труба ТБ 159х20 (ДСТУ 8938:2019)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.068531
2.Стержні нижнього поясу діафрагми жорсткості	Труба ТБ 159х20 (ДСТУ 8938:2019)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.068531
3.Елементи решітки діафрагми жорсткості	Труба ТБ 76 х 10 (ДСТУ 8938:2019)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.01627
4. Бортові елементи	Труба ТБ 325 х 8,5 (ДСТУ 8938:2019)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.0663185
5. Стержні криволінійної поверхні	Труба ТБ 245 х 25 (ДСТУ 8938:2019)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.135583
6. Колони	Труба ТБ 273 х 40 (ДСТУ 8938:2019)	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	С235	0.229751

Задля автоматизованого підбору перерізів в модулі «Метал» всім елементам розрахункових моделей було призначено параметри конструювання (рис.5.6,б) згідно умов норм проектування [2].



а)

б)

Рис.5.6 Вікно варіантів конструювання-а; вікно призначення параметрів металевих конструкцій -б

Під час призначення матеріалів для конструктивних груп стержнів, що були попередньо прийняті, застосували для стрижнів типологічно верхнього та нижнього поясів – елемент поясу ферми», а для елементів решітки прийняли тип «елемент решітки ферми».

Розрахунок конструкцій із сталі відбувався у її пружній стадії роботи.

5.2.4 Граничні умови для конструкцій, що досліджуються

З'єднання стержнів криволінійної поверхні оболонки вважаємо шарнірним. Конструкція оболонки в чотирьох кутах спирається на колони.

5.2.5 Навантаження, що призначається

Базовими навантаженнями, які прийнято на оболонку, є власна вага самої стержньової оболонки, власна вага конструкції покрівлі й снігове навантаження. Як вказують дослідження [4] вітровими навантаженнями є можливість знехтувати, оскільки зусилля від вітрового впливу становлять приблизно 1%. Таким чином вплив таких зусиль на напружено-деформований стан всієї оболонки не вважається суттєвим.

Оскільки будівля зводиться в місті Суми, то характеристичне значення навантаження від снігу згідно норм [3] складає $0,164 \text{ т/м}^2$.

У розрахунку передбачено прийнято три види завантаження (табл. 5.3):

Таблиця 5.3 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

Таблиця 5.4 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 30кг/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 (1640 Па=1,64 кН/м ²)	1,64	1,14	1,87
Повне навантаження	2,024		2,16

На рис. 5.7 наведено діалогове вікно призначення навантажень на структурну плиту.

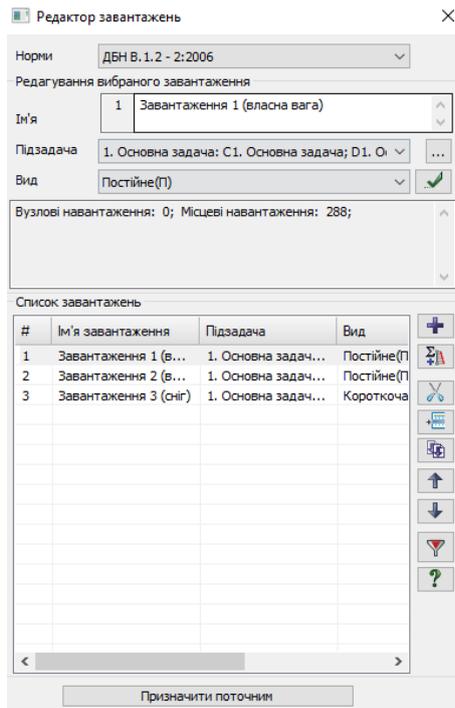
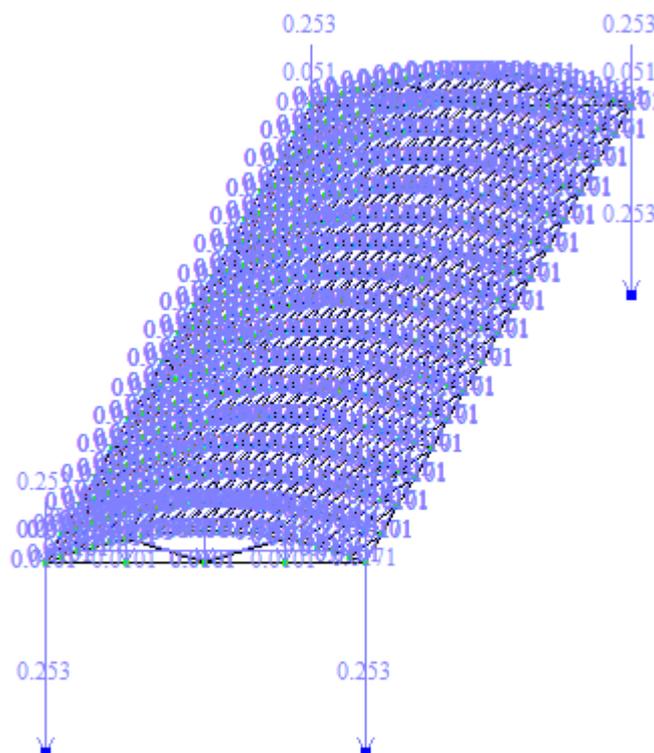


Рис. 5.7 Вікно призначення навантажень на структурну плиту

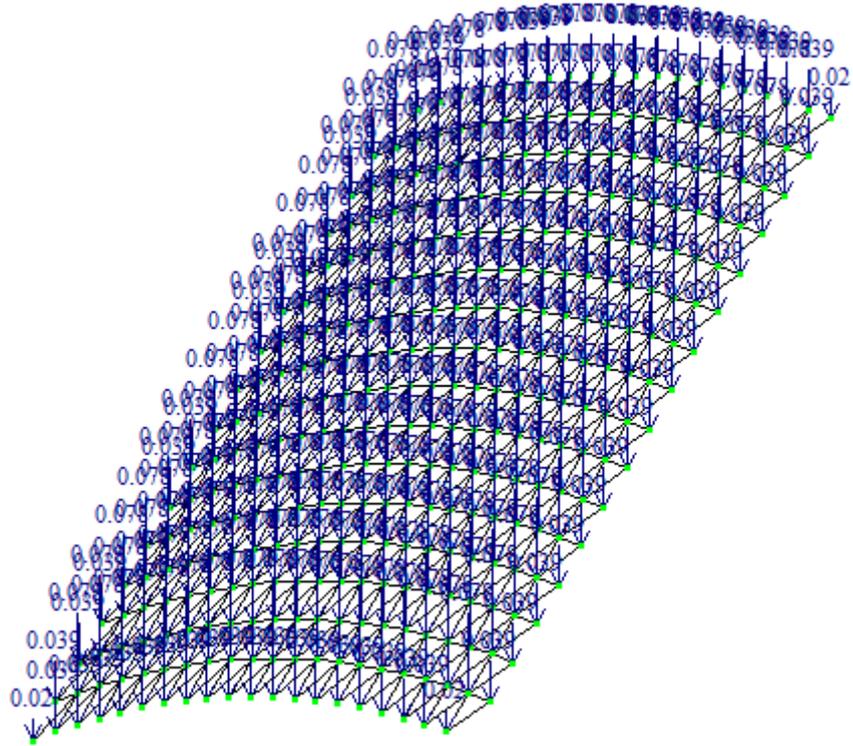
Навантаження у Завантаженнях №2 та 3 від рівномірно розподіленого навантаження приведені до вузлових навантажень згідно вантажній площі для вузлів криволінійної поверхні.

На рис. 5.8 наведено всі види завантажень вузлів верхнього поясу завантаження згідно прийнятих типів навантажень.

а)



б)



в)

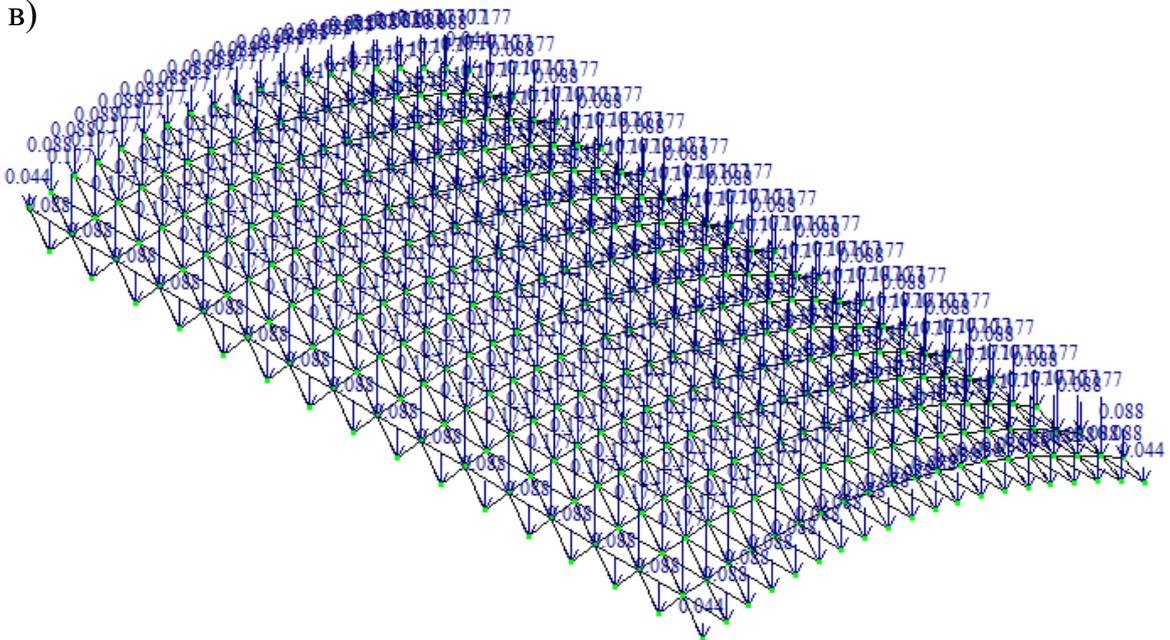


Рис.5.8 Завантаження, що діє на циліндричну оболонку: власна вага конструкції -а; вага конструкції покрівлі -б; снігове навантаження - в

РОЗДІЛ 6

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ

6.1 Аналіз деформованого стану моделей, що досліджуються

В таблиці наведено дані щодо максимальних вертикальних переміщень стержнів, що формують поверхню циліндричної сітчастої оболонки від прийнятих розрахункових навантажень.

Таблиця 6.1. Максимальні вертикальні переміщення вузлів поверхні сітчастої циліндричної оболонки

№ РСН	Схема№1	Схема№2	Схема№3	Схема№4
РСН 1	-12,9	-22,3	-21,5	-19,5
РСН 2	-32	-37,7	-36,1	-32,9
РСН 3	-30,1	-36,2	-34,6	-31,6

На рис.6.1 наведено діаграму максимальних вертикальних переміщень вузлів стержнєвої оболонки.

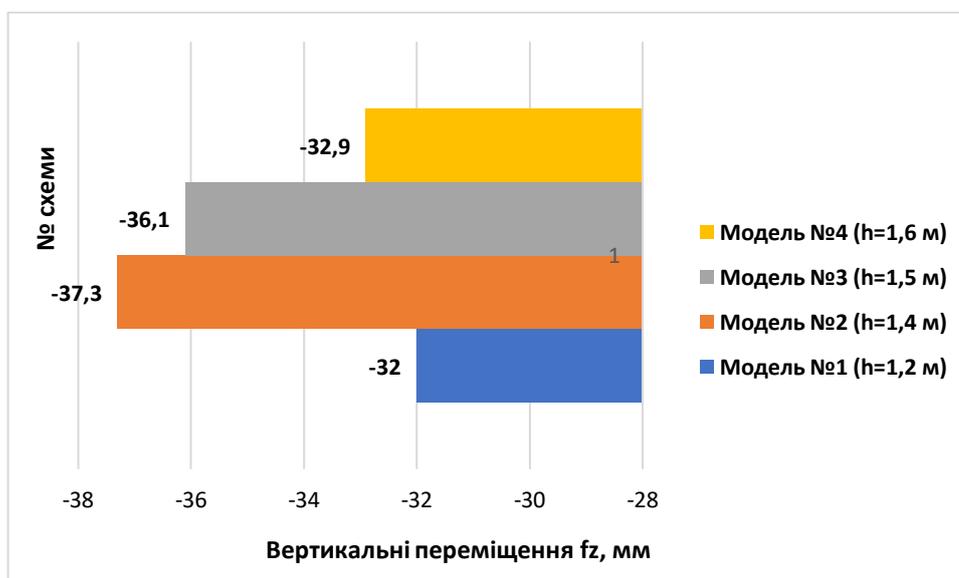


Рис. 6.1 Діаграма максимальних вертикальних переміщень вузлів стержнєвої оболонки від РСН2

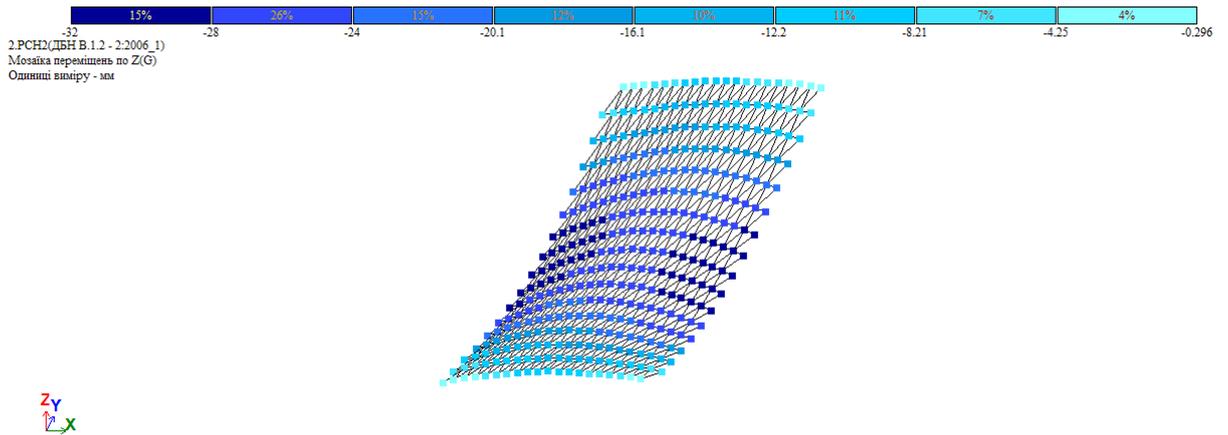


Рис.6.2 Мозаїка переміщень fz від для моделі №1 від РСН 2 та деформована схема моделі

Отже, найбільш жорсткою моделлю є модель циліндричної оболонки із найменшою стрілою підйому – модель №1 із висотою 1,2 м, а найбільш деформуємою моделлю є модель №2.

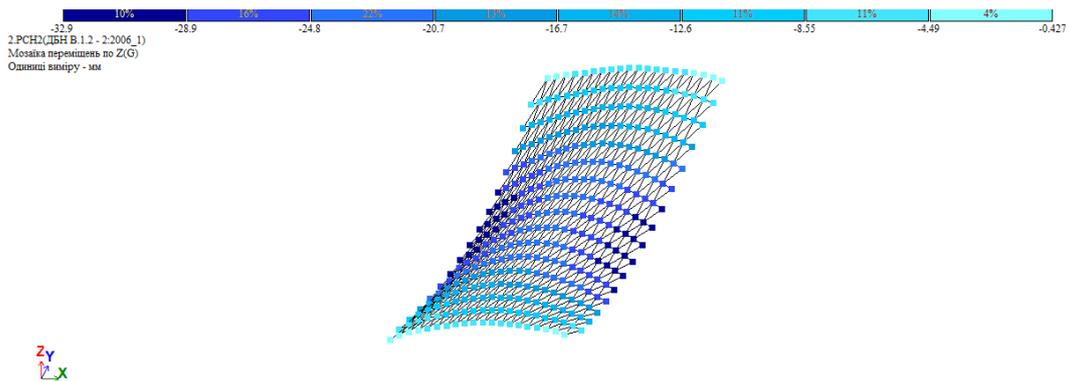


Рис. 6.3 Мозаїка переміщень fz від для моделі №4 від РСН 2 та деформована схема моделі

Із табл. 6.1 видно, що максимальний вертикальний прогин (вертикальне переміщення вузлів) є найменшим для моделі №1. Усі максимальні прогини для усіх розрахункових схем є в допустимих межах. Максимальний граничний прогин для моделей оболонки становить:

$$f_u = \frac{L}{250} = \frac{2400}{250} = 9,6 \text{ см}$$

6.2 Аналіз напруженого стану моделей, що досліджуються

В таблицях 6.2-6.9 наведено максимальні значення осьових сил N від розрахункових сполучень навантажень для стержньових елементів діафрагми жорсткості сітчастої оболонки.

Таблиця 6.2. Максимальні зусилля N (т) в стержнях верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості

№ РСН	Схема№1	Схема№2	Схема№3	Схема№4
РСН 1	-22,3	-43	-41,7	-40,8
РСН 2	-54	-72	-70	-68
РСН 3	-50,8	-69,1	-67,2	-65,3

Таблиця 6.3. Максимальні зусилля N (т) в стержнях нижнього поясу торцевої діафрагми жорсткості

№ РСН	Схема№1	Схема№2	Схема№3	Схема№4
РСН 1	21,5	40,4	38,9	37,6
РСН 2	52,3	67,7	65,2	62,6
РСН 3	49,2	64,9	62,6	60,1

Таблиця 6.4. Максимальні зусилля N (т) елементах решітки торцевої діафрагми жорсткості

№ РСН	Схема№1		Схема№2		Схема№3		Схема№4	
РСН 1	-1,76	3,79	-3,76	6,41	-3,67	6,08	-3,74	5,81
РСН 2	-4,62	9,39	-6,45	10,8	-6,31	10,2	-6,31	9,61
РСН 3	-4,34	8,83	-6,18	10,4	-6,05	9,79	-6,05	9,23

Таблиця 6.5. Максимальні зусилля N (т) бортових елементах оболонки

№ РСН	Схема№1	Схема№2	Схема№3	Схема№4
РСН 1	14,5	28,1	27,2	26
РСН 2	36,3	47,5	46,1	43,9
РСН 3	34,1	45,6	44,2	42,1

Таблиця 6.6. Максимальні зусилля N (т) стержнях криволінійної поверхні оболонки

№ РСН	Схема№1		Схема№2		Схема№3		Схема№4	
РСН 1	-10,9	18,9	-21	36,4	-20,2	35,1	-19,4	33,4
РСН 2	-27	47,3	-35,6	61,6	-34	59,4	-32,5	56,5
РСН 3	-25,4	44,5	-33,9	59,1	-32,7	57	-31,2	54,2

Таблиця 6.7. Максимальні зусилля N (т) в колонах

№ РСН	Схема№1	Схема№2	Схема№3	Схема№4
РСН 1	-11,9	-23,1	-23	-23,2
РСН 2	-26,4	-37,4	-37,3	-37,5
РСН 3	-24,9	-35,9	-35,9	-36

Таблиця 6.8. Максимальні моменти M_y (т·м) в колонах

№ РСН	Схема№1		Схема№2		Схема№3		Схема№4	
РСН 1	-0,99	1,02	-1,51	1,51	-1,36	1,35	-1,18	1,18
РСН 2	-2,38	2,42	-2,5	2,5	-2,26	2,26	-1,95	1,95
РСН 3	-2,24	2,28	-2,4	2,4	-2,17	2,16	-1,87	1,87

Таблиця 6.9. Максимальні моменти M_z (т·м) в колонах

№ РСН	Схема№1		Схема№2		Схема№3		Схема№4	
РСН 1	-2,33	2,38	-4,22	4,22	-4,07	3,86	-3,74	3,74
РСН 2	-5,83	5,89	-7,12	7,12	-6,83	6,53	-6,31	6,31
РСН 3	-5,48	5,54	-6,83	6,83	-6,56	6,24	-6,05	6,050

Як видно із таблиць 6.2-6.9 стержні сітчастої циліндричної оболонки від вертикального завантаження зазнають переважно осьових зусиль розтягу-стиску N . Колони (опорні стійки) працюють на стиск з вигином в двох площинах – XOZ та YOZ .

На рис. 6.4-6.9 наведено діаграми максимальних значень характеристик напружено-деформованого стану для моделей оболонки 1-4 від РСН2.

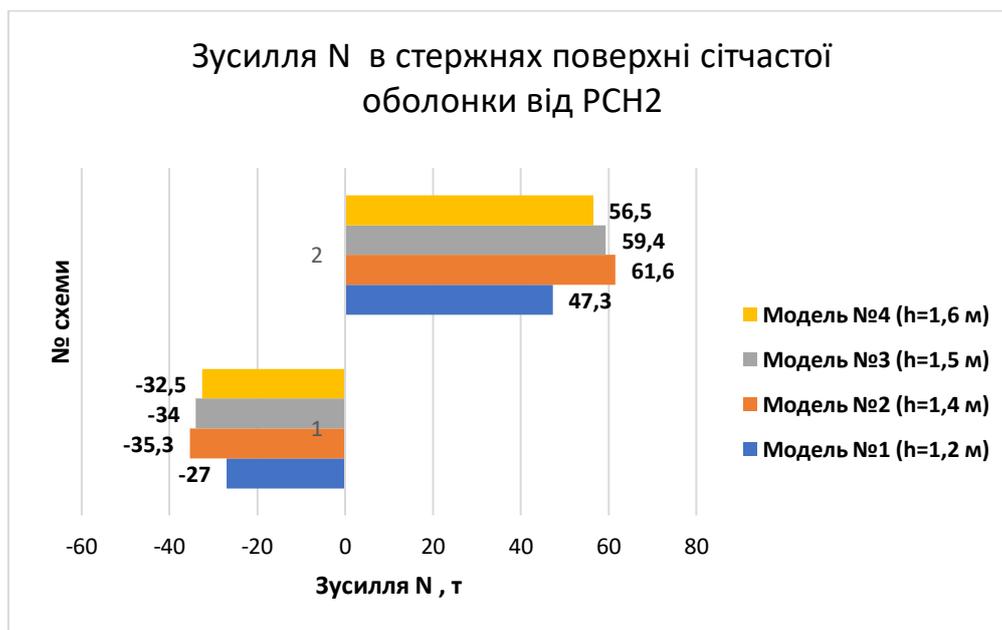


Рис.6.4 Максимальні зусилля $N(t)$ в стержнях поверхні сітчастої оболонки від РСН2

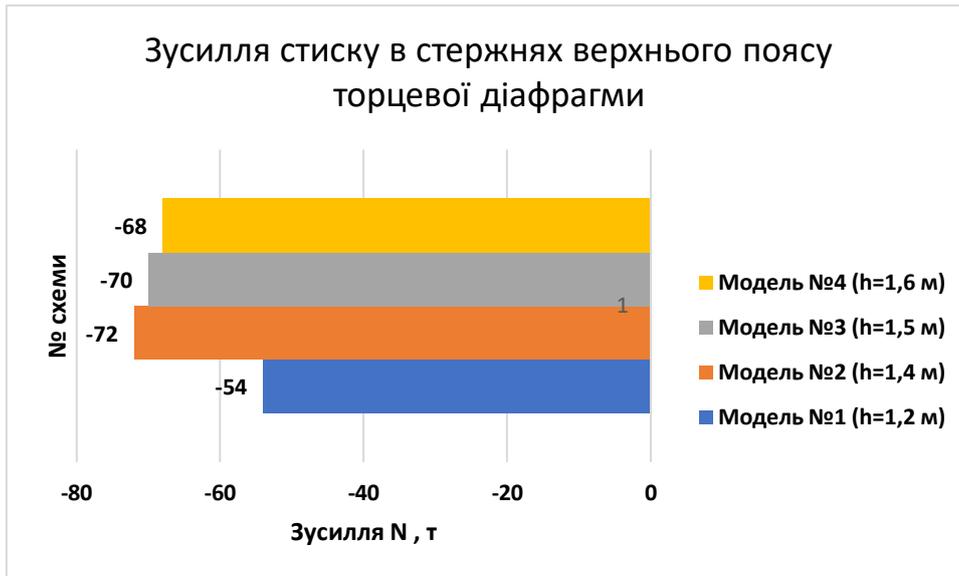


Рис. 6.5 Максимальні зусилля $N(t)$ в стержнях в стержнях верхнього поясу торцевої діафрагми від РСН2

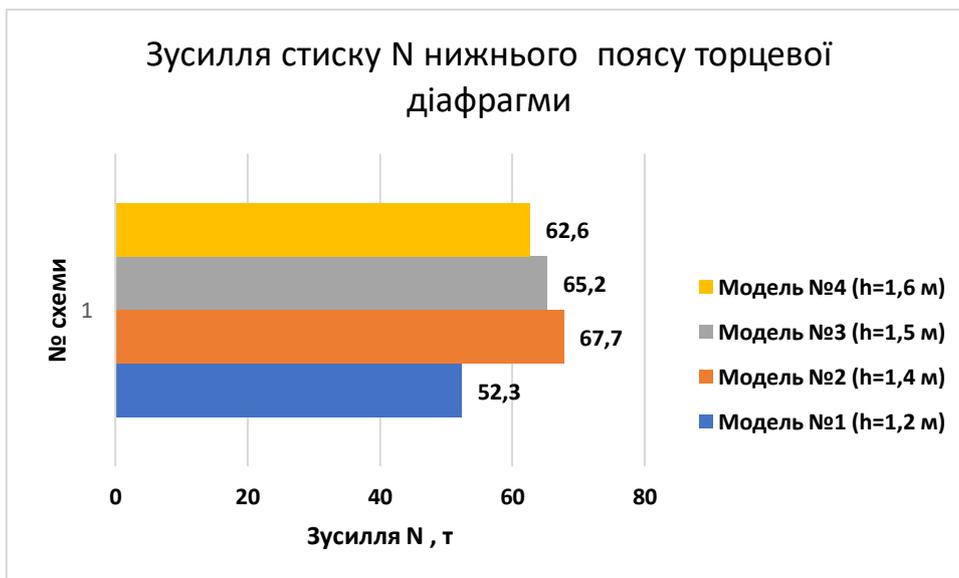


Рис.6.6 Максимальні зусилля $N(t)$ в стержнях в стержнях нижнього поясу торцевої діафрагми від РСН2

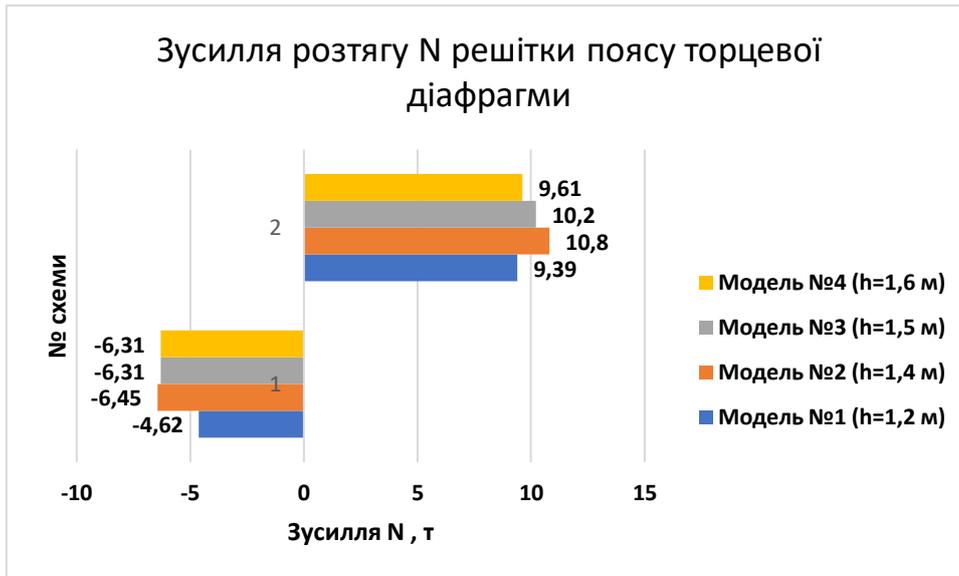


Рис.6.7 Максимальні зусилля N(t) в стержнях в стержнях решітки торцевої діафрагми від РСН2

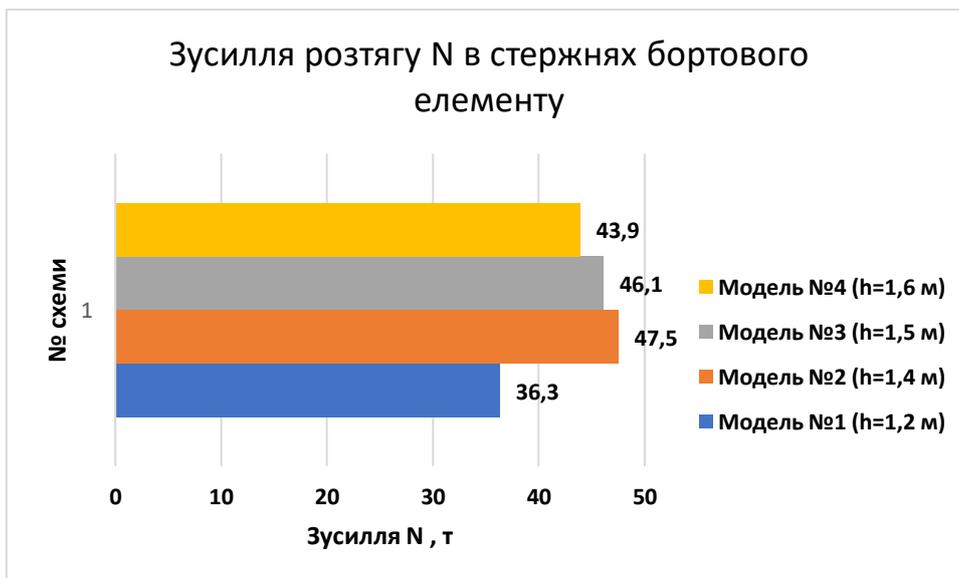


Рис. 6.8 Максимальні зусилля N(t) в стержнях в стержнях бортового елемента від РСН2

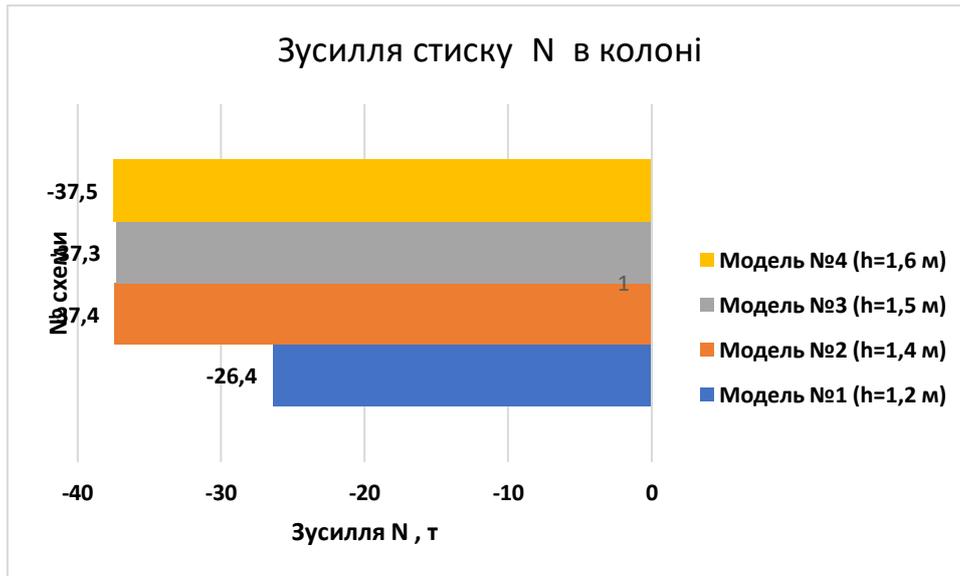


Рис. 6.9 Максимальні зусилля N(т) в колонах від РСН2

На рис. 6.10-6.11 показано мозаїки щодо ступеня використання несучої здатності перетину трубчастих стержнів (в %) для конструктивних груп елементів згідно умов ІГС із поперечним перетинами, які призначено в вихідних даних.

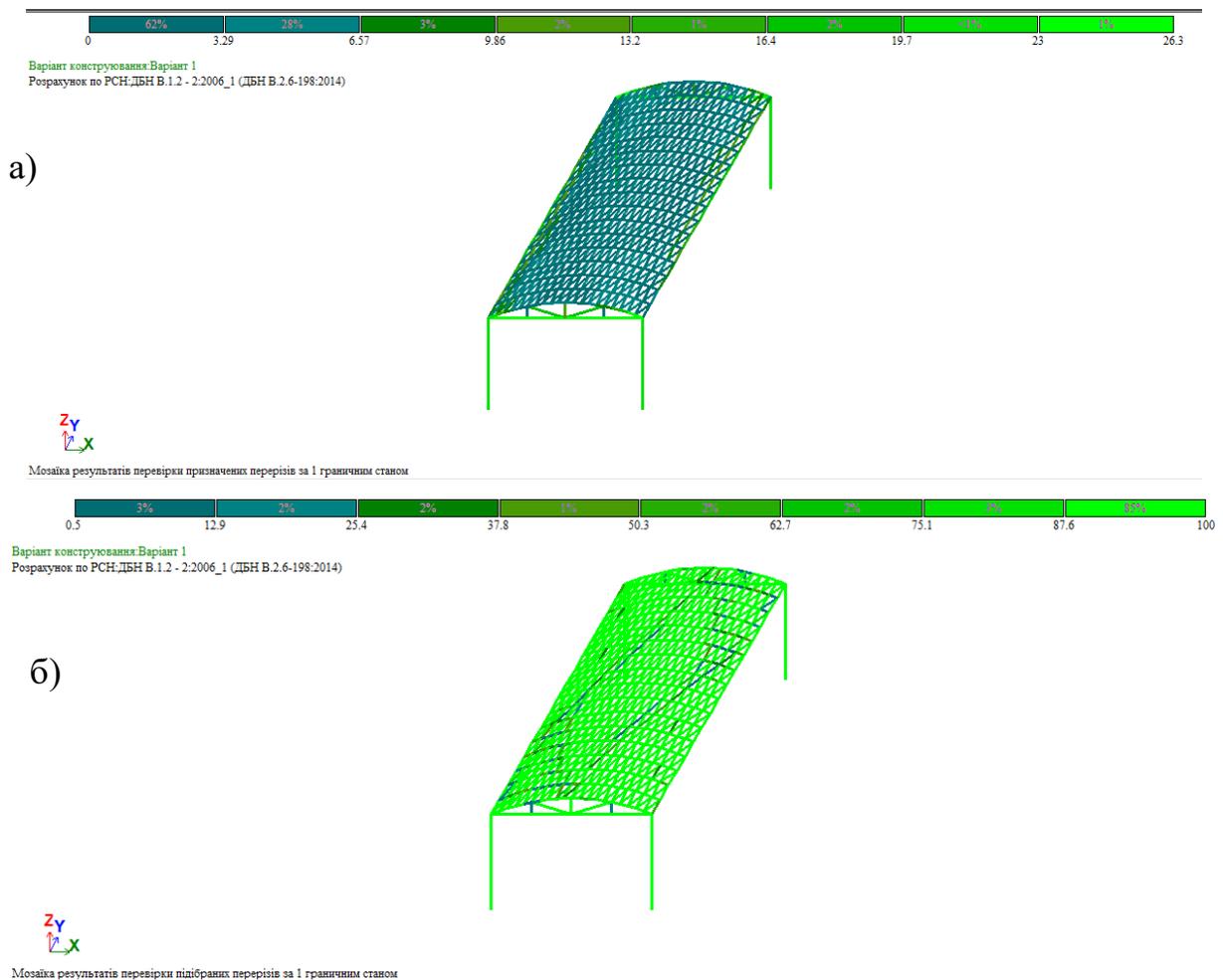


Рис. 6.10 Мозаїка результатів для схеми №1: при розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності -а; мозаїка результатів розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що є підібраними в модулі «Металл»-б

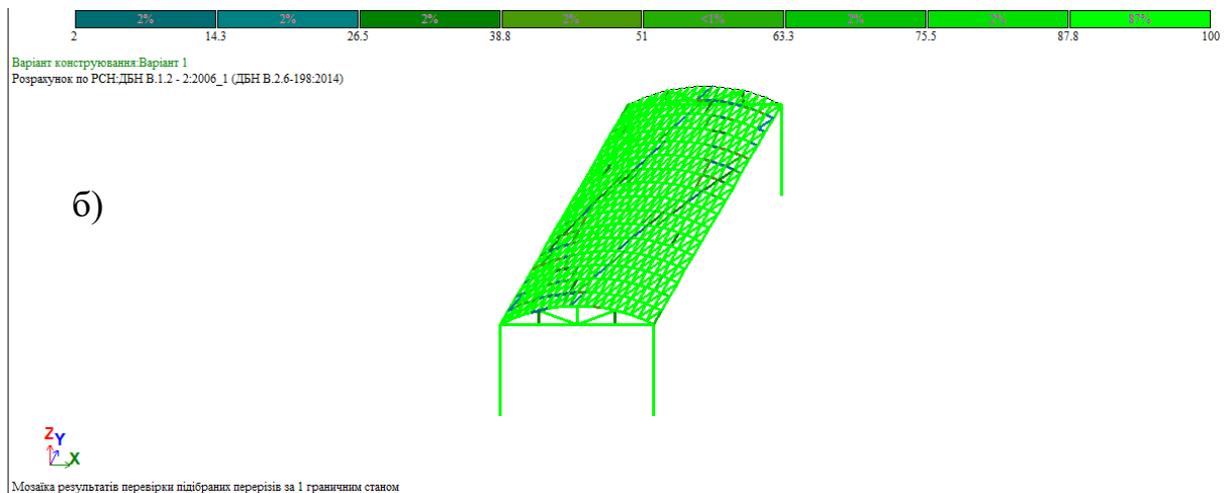
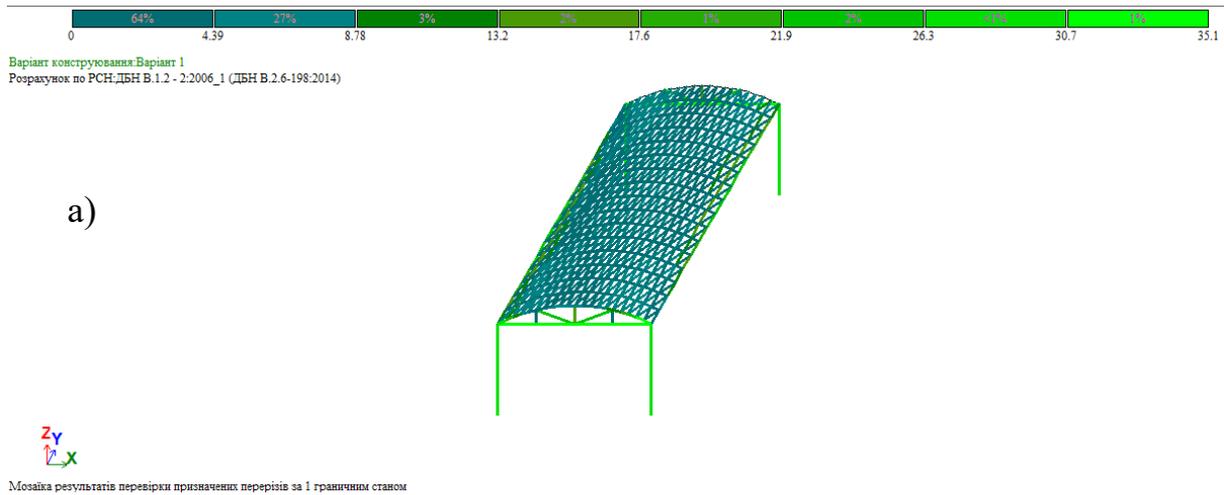


Рис. 6.11 Мозаїка результатів для схеми №2: при розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності -а; мозаїка результатів розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що є підібраними в модулі «Металл»-б

Для аналізу ефективності попередньо прийнятих профілів для всіх груп конструктивних елементів моделей, що досліджуються, зведемо дані

щодо максимального відсотку використання перерізу після першого ітераційного розрахунку.

У таблиці 6.10 наведено максимальний % використання перерізу після першого ітераційного розрахунку при статичному розрахунку.

Таблиця 6.10 – Максимальне використання, (%) перерізу після 1-ї ітерації, що призначені у вихідних даних

Назва конструктивної групи стержнів	Згідно перевірки за умовами 1ГС			
	Схема №1	Схема №2	Схема №3	Схема №4
Верхній пояс торцевої діафрагми жорстості	26,3	35,1	34,1	33,2
Нижній пояс торцевої діафрагми жорстості	25,5	33	31,8	30,6
Решітка торцевої діафрагми жорстості	19,3	22,2	21	19,7
Бортові елементи	18,3	24	23,2	22,1
Стержні поля оболонки	12,2	15,9	15,3	14,6
Колони	22,5	27,7	26,7	25

6.3 Аналіз стійкості моделей, що досліджуються

Коефіцієнт стійкості є параметром, що показує, ступінь стійкості системи щодо збурень чи змін умов, що виникають ззовні. Коефіцієнт стійкості може мати як позитивне так і негативне значення. У випадку, коли коефіцієнт має знак «-», то система визнається не стійкою й потребує статичного аналізу та зміни конструктивних рішень.

Ціла частина числа, що є коефіцієнтом стійкості показує, у скільки разів ще можна збільшити навантаження системи з тим, щоб вона втратила стійкість.

На рис. 6.12 -6.15 показані форми втрати стійкості для всіх чотирьох моделей та наведено коефіцієнти стійкості для моделей (табл. 6.11).

2.РСНЗ(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Форма втрати стійкості у гл. с. 1
Коефіцієнт 5.17627

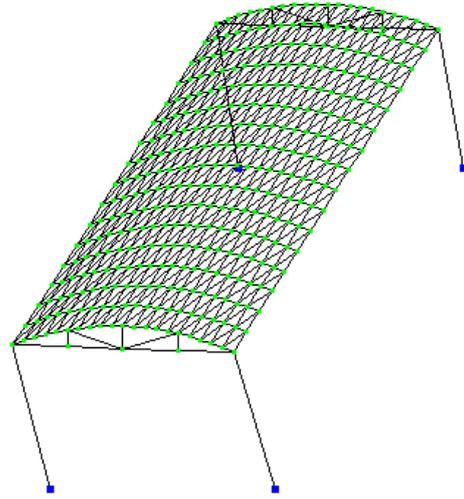


Рис.6.12 Форма втрати стійкості для моделі №1 ($k=5,17$)

3.РСНЗ(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Форма втрати стійкості у гл. с. 1
Коефіцієнт 3.78483

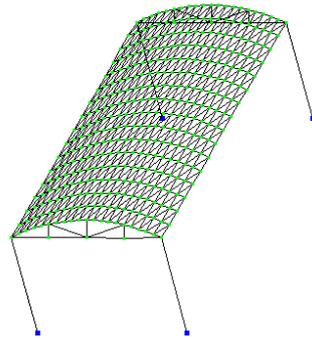


Рис.6.13 Форма втрати стійкості для моделі №2 ($k=3,78$)

3.РСНЗ(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Форма втрати стійкості у гл. с. 1
Коефіцієнт 3.81996

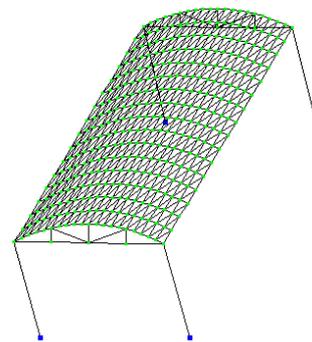


Рис.6.14 Форма втрати стійкості для моделі №3 ($k=3,82$)

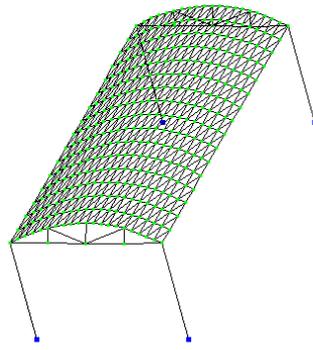


Рис.6.15 Форма втрати стійкості для моделі №4 ($k=3,63$)

Таблиця. 6.11 Коефіцієнти стійкості для моделей циліндричної оболонки, що досліджується

	Схема №1	Схема №2	Схема №3	Схема №4
k	5,17	3,78	3,82	3,63

Дані із таблиці 6.11 наведено на рис. 6.16.

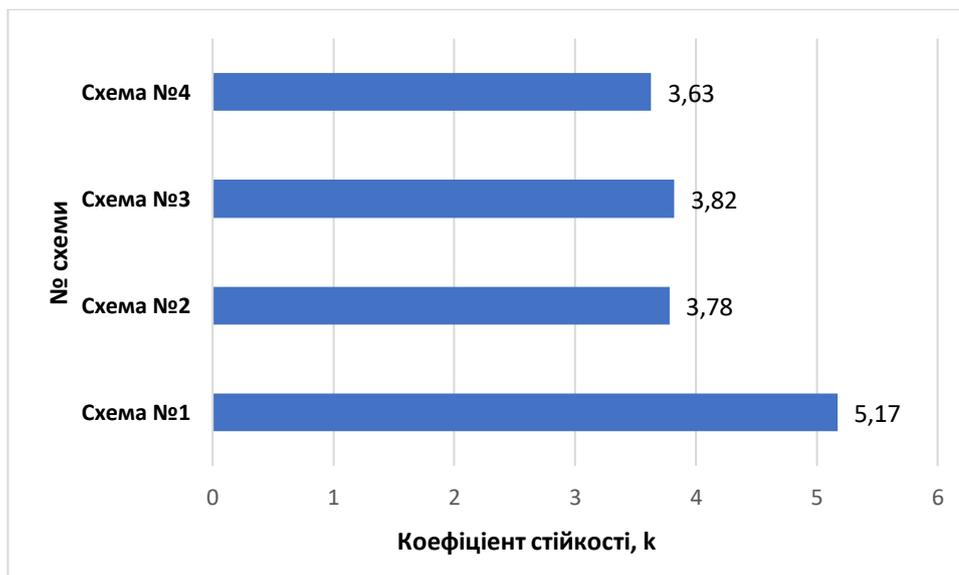


Рис.6.16 Коефіцієнт стійкості k для моделей, що досліджуються

Очевидно, що найбільшим запасом стійкості характеризується оболонка за моделлю №1, що має найменшу висоту -1,2 м. Так, для повної втрати стійкості моделі №1 її треба навантажити навантаженням, що в 5 разів є більшим від того, що вже діє на систему. Моделі №№2-4 можна

завантажити навантаженням майже в 4 рази більшим, ніж те, що вже до них прикладено для того, щоб система стала не стійкою.

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

В таблицях 6.12-6.18 після 1-ї ітерації згідно результатів статичного розрахунку приведено дані підбору нових перерізів трубчатого типу для усіх груп конструктивних груп елементів моделей, що досліджуються.

Таблиця 6.12 Підбір елементів **верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості** поясу 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 159*20	С235	ТБ 76*10	0,01627	11,686	0,19013122
2			ТБ 121*8	0,020985	12,436	0,260963
3			ТБ 83*14	0,023813	12,482	0,297238
4			ТБ 108*8,5	0,020849	12,546	0,261572

Таблиця 6.13 Підбір елементів **нижнього поясу торцевої діафрагми жорсткості** поясу 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 159*20	С235	ТБ 146*5	0,0173793	12	0,2085516
2			ТБ 159*6	0,02263	12	0,27156
3			ТБ 133*7	0,021743	12	0,260911
4			ТБ 159*5,5	0,020812	12	0,249744

Таблиця 6.14 Підбір елементів стержнів решітки торцевої діафрагми жорсткості поясу 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 76*10	С235	ТБ 50*2,8	0,0032579	20,352	0,06630559
2			ТБ 42*3	0,002884	19,9	0,057396
3			ТБ 50*3	0,003476	20,26	0,070421
4			ТБ 50*2,8	0,003258	20,94	0,068221

Таблиця 6.15 Підбір бортових елементів оболонки 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 325*8,5	С235	ТБ 114*4,5	0,012147	48	0,583056
2			ТБ 140*4,5	0,015031	48	0,721498
3			ТБ 140*4,5	0,015031	48	0,721498
4			ТБ 114*5,5	0,014711	48	0,706114

Таблиця 6.16 Підбір стержнів криволінійної поверхні оболонки 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 245*25	С235	ТБ 133*5	0,0157769	696,89	10,9947638
2			ТБ 168*8	0,031554	708,14	22,34451

3			ТБ 152*5,5	0,019863	708,83	14,07942
4			ТБ 133*6	0,018784	709,79	13,33298

Таблиця 6.17 Підбір колон оболонки після ітераційного розрахунку №1
(ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийнятий профіль	Сталь	Профіль труби	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 273*40	С235	ТБ 273*6,5	0,0427025	28,8	1,229832
2			ТБ 273*8	0,052261	28,8	1,50512
3			ТБ 273*7,5	0,049087	28,8	1,413711
4			ТБ 273*7	0,045901	28,8	1,321949

Таблиця 6.18 Підрахунок ваги моделей циліндричної оболонки

Назва групи конструктивних елементів	Схема №1	Схема №2	Схема №3	Схема №4
Верхній пояс торцевої діафрагми жорсткості	0,19	0,26	0,30	0,26
Нижній пояс торцевої діафрагми жорсткості	0,21	0,27	0,26	0,25
Розкоси торцевої діафрагми жорсткості	0,07	0,06	0,07	0,07
Бортові елементи	0,58	0,72	0,72	0,71
Стержні криволінійної поверхні	10,99	22,34	14,08	13,33
Колони	1,23	1,51	1,41	1,32
Всього:	13,27	25,16	16,84	15,94

Дані із таблиць 6.12-6.18 проілюстровано на рис. 6.17-6.23 у вигляді стовбчатих діаграм.



Рис. 6.17 Вага верхнього поясу діафрагми жорсткості

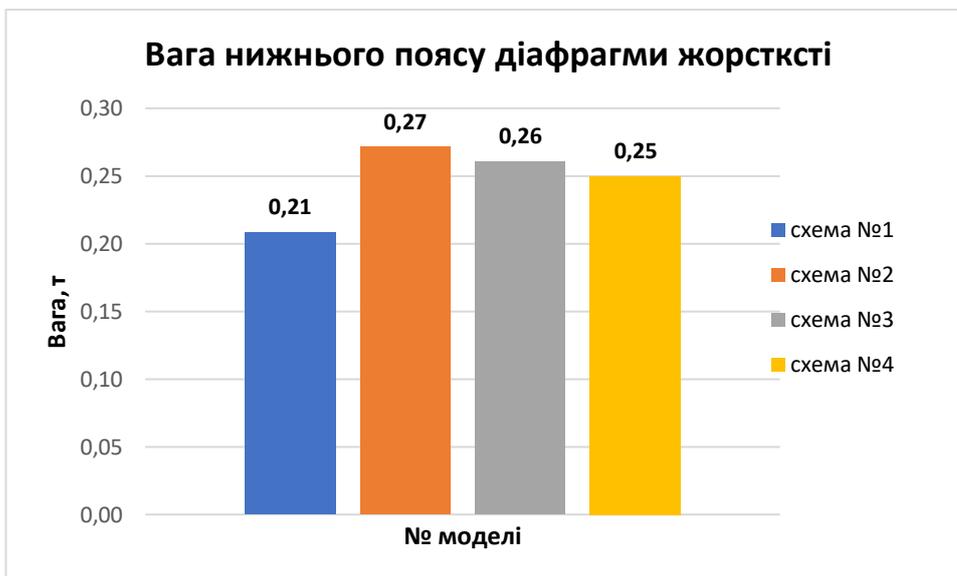


Рис. 6.18 Вага нижнього поясу діафрагми жорсткості



Рис. 6.19 Вага елементів решітки діафрагми



Рис. 6.20 Вага бортових елементів оболонки



Рис. 6.21 Вага стержнів криволінійної поверхні оболонки

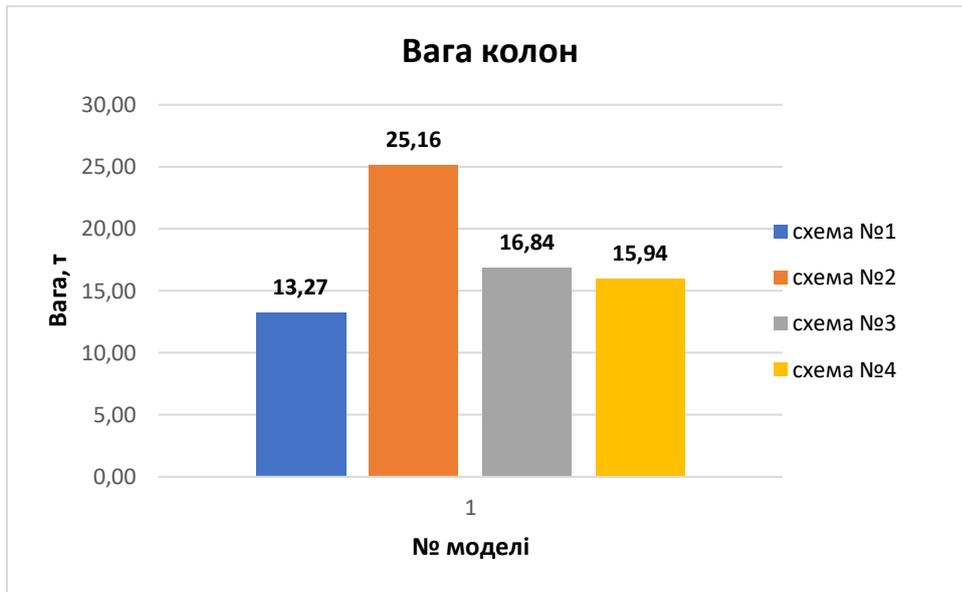


Рис. 6.22 Вага колон

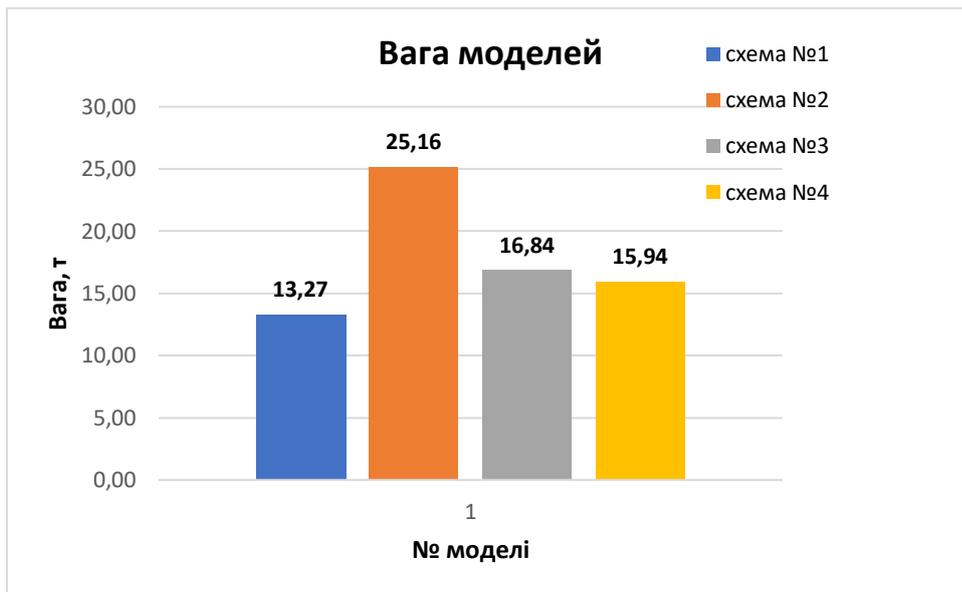


Рис. 6.23 Загальна вага моделей

ВИСНОВКИ

1. Легкі сітчасті оболонки покриття, зокрема нульової Гаусової кривини, якими є циліндричні оболонки є ефективними конструкціями покриття, що дозволяють перекрити великі прольоти без улаштування додаткових опор.

2. Сітчасті стержньові оболонки є чутливими до зміни напружено-деформованого стану, що залежить від зміни будь-яких геометричних чи конструктивних параметрів.

3. Зміна стріли підйому оболонки при незмінності решти геометричних та конструктивних параметрів оболонки значним чином впливає на перерозподіл та зміну зусиль в стержневих елементах конструкції.

4. Діаграми на рис.6.4-6.9 свідчать, що найменші осьові зусилля розтягу-стиску виникають в усіх конструктивних групах елементах в схемі, що має найменше значення стріли підйому – 1,2 м (схема №1). Найбільші осьові зусилля виникають в конструктивних групах стержнів моделі №2 (стріла підйому становить 1,4 м).

5. Найбільш стійкою конструкцією оболонка за схемою №2 також, найменш стійкою є модель №4 з найбільшою стрілою підйому -1,6 м.

6. Максимальний % використання перерізу для всіх груп конструктивних елементів після першого ітераційного розрахунку притаманний також для моделі з найменшою висотою стріли підйому -1,2 м.

7. Для циліндричних сітчастих оболонок рекомендовано приймати стрілу підйому оболонки в межах $(1/15 \dots 1/20)l$, де l – проліт оболонки.

8. Статичний та конструктивний розрахунок виявили, що з-поміж моделей, що досліджувалися, найбільш ефективною за критерієм напружено-деформованого стану та ваги виявилася модель №1 зі стрілою підйому $f=(1/20) l$, тобто $f=1,2$ м.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 ДСТУ 8938:2019 Труби сталеві безшовні гарячедеформовані
- 2 ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування.
[Чинний від 2015-01-01]. К.: Мінрегіон України, 2014. 15 с.
(Національний стандарт України)
- 3 ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки
будівельних об'єктів. Навантаження та впливи. Норми
проектування
- 4 Ehren, H. Mathematical methods of optimisation. In Handbook of
measurement system design ; Sydenham, P. H., Thorne, R., Ed.; John
Wiley & Sons: Hoboken, New Jersey, USA, 2005; pp. 1648.
- 5 Sinha, GR Modern Optimisation Methods for Science, Engineering
and Technology ; Institute of Physics Press: Bristol, UK, 2020; pp. 1-
18
- 6 Kawazzuchi, M. Optimisation methods: from theory to design ;
Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013; p. 257.
- 7 Haslinger, J.; Mäkinen, RAE Introduction to shape optimisation: theory,
approximation and computation ; SIAM: Philadelphia, PA, USA, 2003
- 8 Aller, G. ; Anro, A. On some recent advances in shape optimisation.
Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIB-Mechanics
2001 , 329 , 383-396
- 9 Souza, M.; Pauletti, R. M. Parametric design and optimisation of shell
structures using the natural force density method. In Proceedings of the
IASS Annual Symposium on Spatial Structures in the 21st Century,
Tokyo, Japan, 26-30 September 2016.
- 10 Sassone, M.; Pugnale, A. Evolutionary structural optimisation in shell
design. Adv. Numer. Anal. Shell-Like Struct. 2007 , 4 , 247-257.
- 11 Cui, G. ANSYS-based shape optimisation. J. Inf. Comput. Sci. 2015 ,
12 , 4291-4297.

- 12 Seranaj, A.; Elezi, E.; Seranaj, A. Structural optimisation of spatial reinforced concrete structures with different structural openings and shapes. Res. Eng. Struct. Mater. 2018 , 4 , 79-89.
- 13 Fossen, SMB Parallel Computing and Optimisation with COMSOL Multiphysics. Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2017.
- 14 Slawig, T.; Prüfert, U. Mathematics-based optimisation in the Comsol Multiphysics environment. In Proceedings of the Comsol User Conference, Stuttgart, Germany, 26-28 October 2011.
- 15 https://en.wikipedia.org/wiki/Vladimir_Shukhov
- 16 COMSOL Multiphysics. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics
- 17 Method of moving asymptotes (ММА). Режим доступа: Method of moving asymptotes - Wikipedia
18. Gill, Philip & Murray, Walter & Saunders, Michael & Drud, Arne & Kalvelagen, Erwin. (2001). SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization. SIAM Review. 47. 10.1137/S0036144504446096.
19. IPOPT. Режим доступа: [IPOPT - Wikipedia](#)
20. Ma H, Fan F, Wen P, Zhang H and Shen S 2015 Experimental and numerical studies on a single-layer cylindrical reticulated shell with semi-rigid joints Thin-Walled Structures 86 pp 1–9
- 21 Nie G, Zhang C, Zhi X and Dai J (2019). Collapse of the single layered cylinder shell with model experimental study Archives of Civil and Mechanical Engineering 19 pp 883–897

- 22 Guo Y-L, Zhang Y-H, Zhu B-L, Zhou P and Pi Y-L (2018) Experimental and numerical studies of instability mechanism and load resistance of rhombic grid hyperboloid-latticed shells under vertical load *Engineering Structures* 166 pp 167–186
- 23 Richardson J N, Adriaenssens S, Coelho R F and Bouillard P. (2013). Coupled form-finding and grid optimization approach for single layer grid shells. *Engineering Structures* 52 pp 230–239
- 24 Zhou X, He Y and Xu L 2009 Formation and stability of a cylindrical ILTDBS reticulated mega-structure braced with single-layer latticed membranous shell substructures *Thin-Walled Structures* 47(5) pp 537–546
- 25 Gao B, Li T, Ma T, Ye J, Becque J and Hajirasouliha I (2018) A practical grid generation procedure for the design of free-form structures *Computers & Structures* 196 pp .292–310
- 26 D’Amico B, Kermani A, Zhang H, Shepherd P and Williams C J K (2015). Optimization of crosssection of actively bent grid shells with strength and geometric compatibility constraints. *Computers & Structures* 154 pp 163–176
- 27 Mesnil R, Douthe C, Richter C and Baverel O 2018 Fabrication-aware shape parametrisation for the structural optimisation of shell structures *Engineering Structures* 176 pp 569–584
- 28 ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. [Чинний від 2007-01-01] К.: Мінбуд України, 2006. (Національний стандарт України)

ДОДАТКИ

Сумський Національний аграрний університет
Кафедра будівельних конструкцій



Напружено-деформований стан циліндричної оболонки в залежності від її висоти

Здобувач: Марченко Сергій Миколайович

Керівник: к.т.н., доцент Срібняк Н.М.

Метою числового дослідження є встановлення напружено-деформованого стану в елементах моделей оболонки, що мають різне значення одного лише параметру- висоти стріл підйому. Напружено-деформований стан обумовлює конструктивне вирішення моделей, а значить й матеріалоємність.

Задачі, що поставлені для досягнення вказаної мети:

- 1) прийняти чотири моделі циліндричної оболонки, стріла підйому яких варіюється в межах $(1/15..1/20)l$, тобто в межах 1,2...1,6 м. Від цього параметру від якого буде залежати напружено-деформований стан оболонки;
- 2) моделювання із застосуванням методу скінчених елементів , використовуючи ПК ЛІРА-САПР чотирьох скінченоелементних моделей одношарової циліндричної оболонки покриття, що відрізняються лише за одним критерієм – висотою стріли підйому

...

- 4) задати при першій розрахунковій ітерації жорсткості для всіх конструктивних груп стержнів для чотирьох моделей оболонки, яка досліджується. Такі параметри жорсткості приймаються рівними;
- 5) виконати 1-й ітераційний статичний розрахунок, використавши первісно прийняті жорсткісні параметри елементів для всіх розрахункових схем одношарової оболонки;
- 6) за результатами даних статичного розрахунку в модулі «Лір-Візор» у модулі «Метал» призначити **нові, запропоновані модулем, перерізи стержньових елементів** всіх конструктивних груп стержнів оболонки;
- 7) обрахувати згідно нових перерізів труб оболонок вагу кожної моделі циліндричної оболонки. Визначити розрахункову схему, яка би мала найменшу матеріалоємність;
- 8) зробити висновки з дослідження

Об'єкт дослідження – чотири моделі одношарової циліндричної оболонки покриття розміром в плані що відрізняються одна від одної лише висотою стріли підйому конструкції ($f_1=1,2$ м, $f_2=1,4$ м, $f_3=1,5$ м, $f_4=1,6$ м).

Предметом дослідження є напружено-деформований стан моделей оболонки, що підлягають розрахунку, конструктивне вирішення цих моделей та їх матеріалоємність.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати числового експерименту дозволяють визначити з-поміж розрахункових схем оболонок, що досліджуються, найбільш ефективну за критерієм найменшої ваги (металоємності) модель.

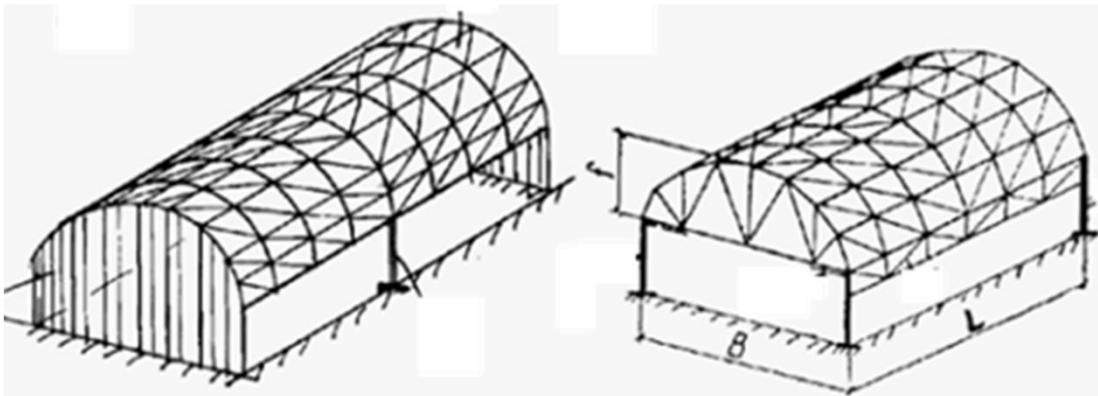
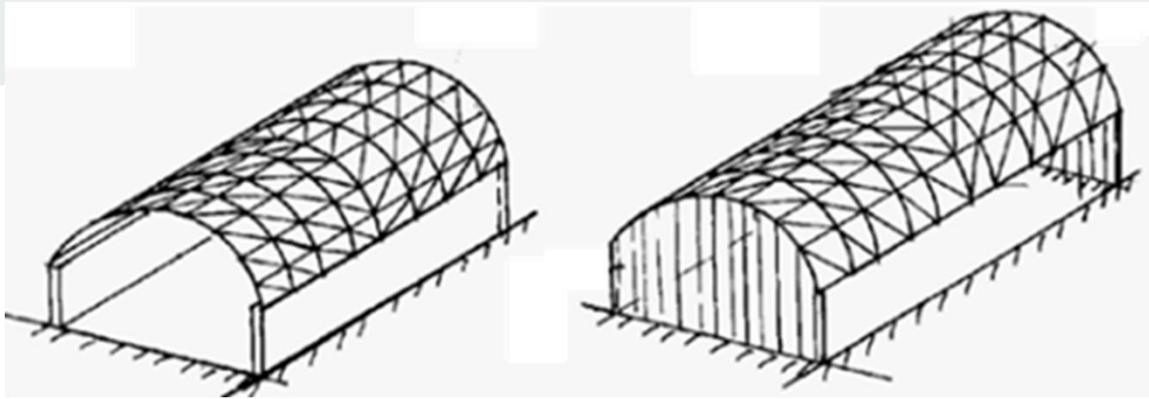


Рис. 1 Приклади можливих геометричних та конструктивних вирішень сітчастих циліндричних оболонок

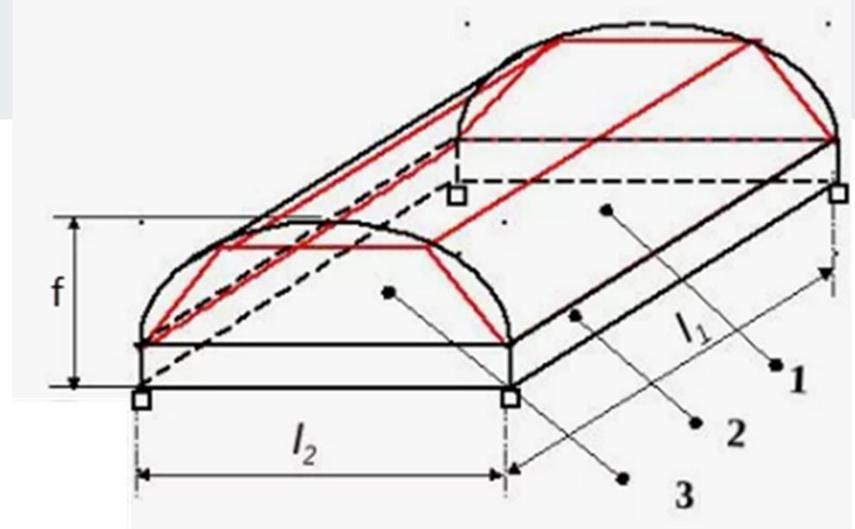


Рис. 2. Елементи циліндричної оболонки: 1-оболонка (шкаралупа); 2- бортовий елемент; 3- торцева діафрагма жорсткості

Оболонки циліндричного типу характеризуються серединною поверхнею, що утворена ковзанням плоскої кривої (твірної) по двом паралельним направляючим, що є прямими лініями.

Оскільки в формоутворенні циліндричної поверхні приймають участь і прямі лінії й крива, то така поверхня має кривину лише в одному напрямку – в напрямку переносу плоскої кривої.

Добуток кривизни твірної на нуль (оскільки в іншому напрямку в кожній точці поверхні кривина відсутня) дає нульове значення. Таким чином циліндричні поверхні також називають поверхнями нульової Гаусової кривини.

Обрис криволінійної твірної приймають за параболою чи колу, а рідше – за еліпсом або іншою математичною кривою високих порядків. Як правило, виготовляються такі оболонки із залізобетону

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метод 1. Метод аналізу



Метод 2. Метод скінчених елементів у механіці будівельних конструкцій

Метод 3. Методика підбору перерізів сталевих елементів за нормами

Метод 4. Аналітична обробка результатів розрахунку

Алгоритм здійснення числового дослідження в ПК ЛІРА-САПР



Просторова модель циліндричної оболонки покриття, що досліджується

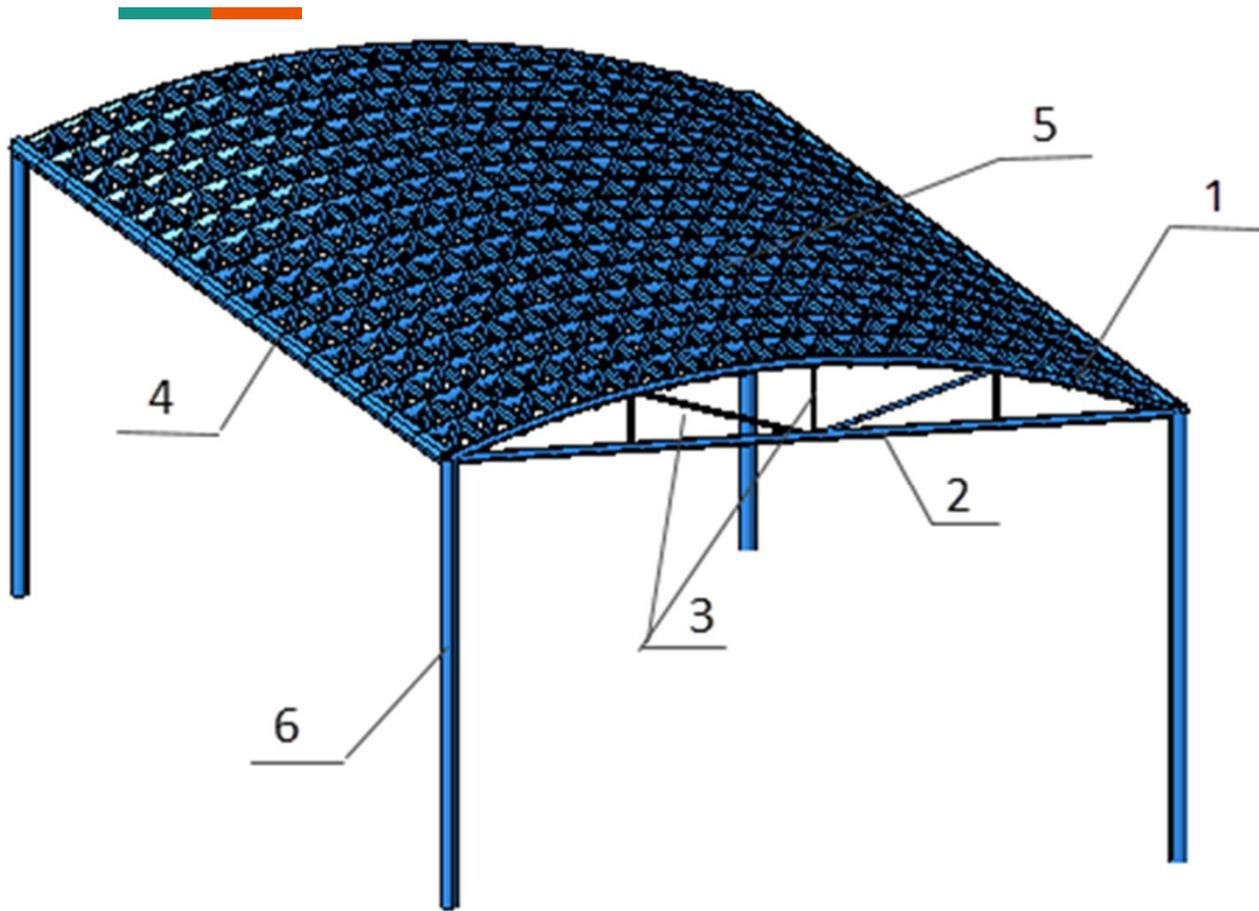


Рис. 3 Просторова модель циліндричної оболонки покриття (на прикладі моделі №1, $h=1,2$ м): стержні верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості -1; стержні нижнього поясу торцевої діафрагми жорсткості -2 ; стержні решітки торцевої діафрагми жорсткості-3; бортові елементи-4; стержні поля (поверхні) оболонки -5; колони -6

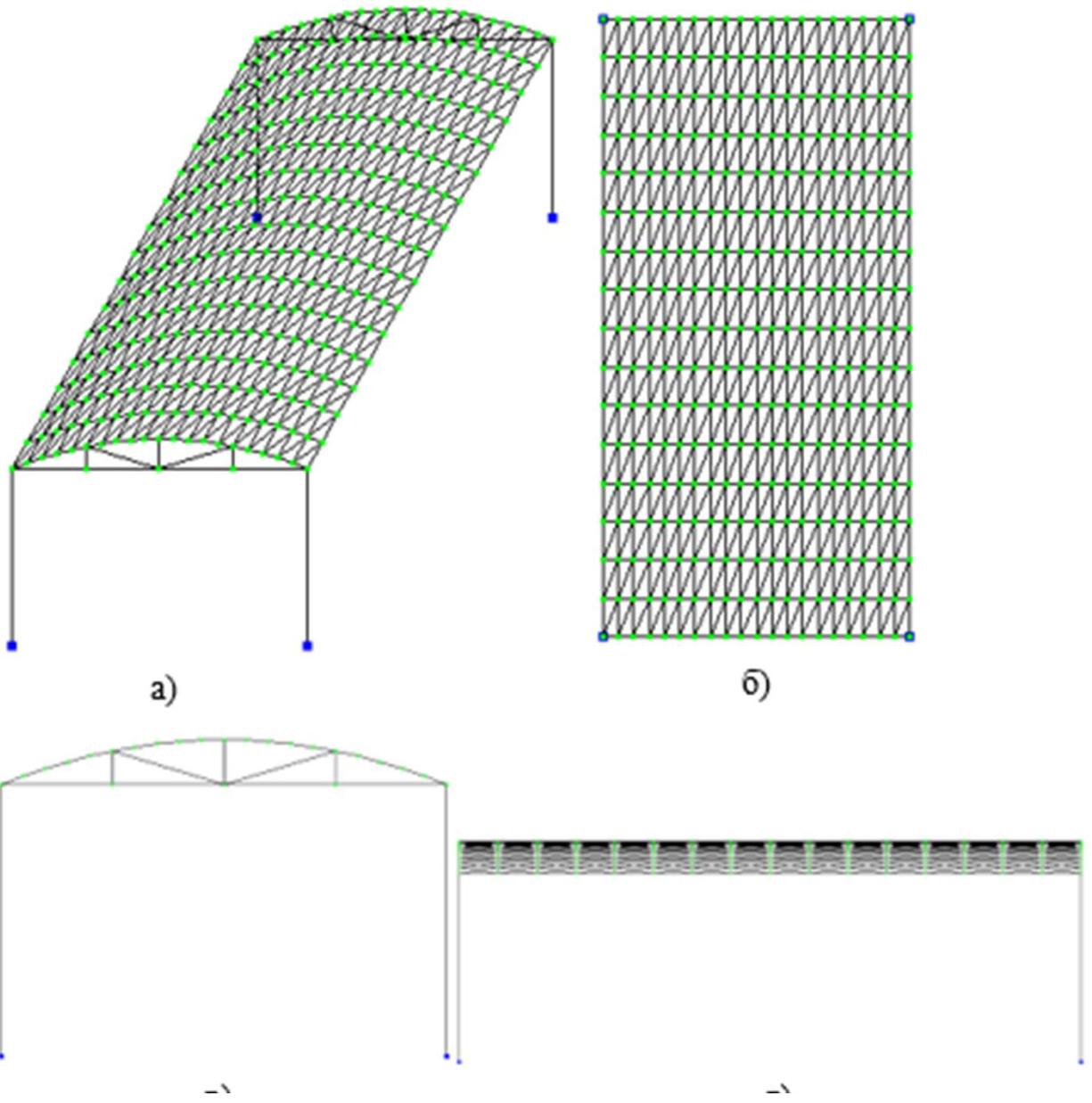


Рис. 4 Скінченоелемента
схема (на прикладі моделі
№1, $h=1,2$ м):
аксонометрична модель -
а; вид в площині XOY - *б*;
вид в площині XOZ - *в*; вид
в площині YOZ - *г*;

Таблиця 1. Геометричні характеристики моделей циліндричної оболонки, що досліджуються

№ моделі	Розміри в плані оболонки $b \times l$, м	Висота оболонки (стріла підйому), м	Формула плоскої твірної в площині XOZ	Вид оболонки в площині XOZ
1	12x24	1,2	$z = -3 \frac{x^2}{9,5^2}$	
2		1,4	$z = -3 \frac{x^2}{8,7^2}$	
3		1,5	$z = -3 \frac{x^2}{8,5^2}$	
4		1,6	$z = -3 \frac{x^2}{8,2^2}$	

Таблиця 3. – Характеристики жорсткостей конструктивних елементів структурного покриття (при ітераційному розрахунку №1)

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м ²	R, т/м ³	μ	Сталь С235	q, т/м
1.Стержні верхнього поясу діафрагми жорсткості	Труба ТБ 159х20 (ДСТУ 8938:2019)	2,1·10 ⁷	7,85	0,3	С235	0.068531
2.Стержні нижнього поясу діафрагми жорсткості	Труба ТБ 159х20 (ДСТУ 8938:2019)	2,1·10 ⁷	7,85	0,3	С235	0.068531
3.Елементи решітки діафрагми жорсткості	Труба ТБ 76 х 10 (ДСТУ 8938:2019)	2,1·10 ⁷	7,85	0,3	С235	0.01627
4. Бортові елементи	Труба ТБ 325 х 8,5 (ДСТУ 8938:2019)	2,1·10 ⁷	7,85	0,3	С235	0.0663185
5. Стержні криволінійної поверхні	Труба ТБ 245 х 25 (ДСТУ 8938:2019)	2,1·10 ⁷	7,85	0,3	С235	0.135583

Таблиця 4.- 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 вагу конструктивних шарів покрівлі
№ 3	Тип – тимчасове, снігове для м. Суми



АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ

Рис. Діаграма максимальних вертикальних переміщень вузлів стержньової оболонки від РСН2

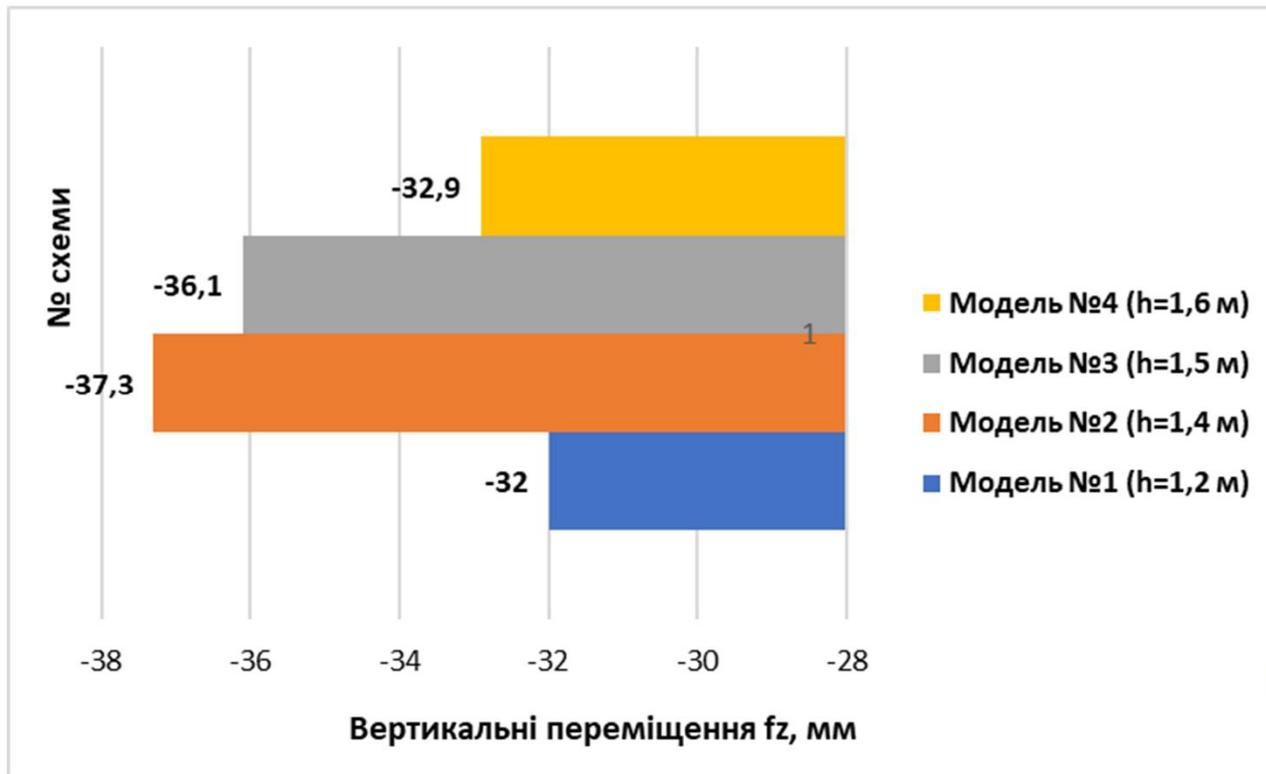
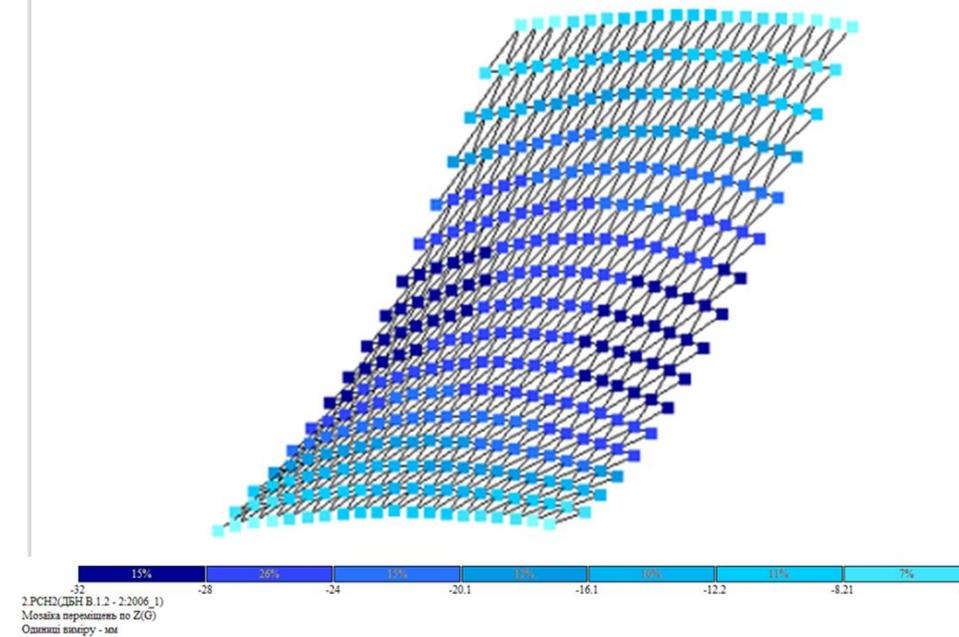


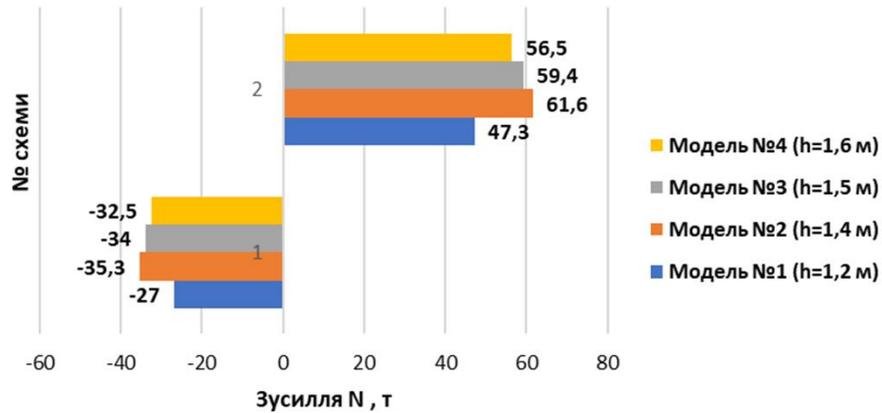
Рис. Мозаїка переміщень f_z від для моделі №1 від РСН 2 та деформована схема моделі



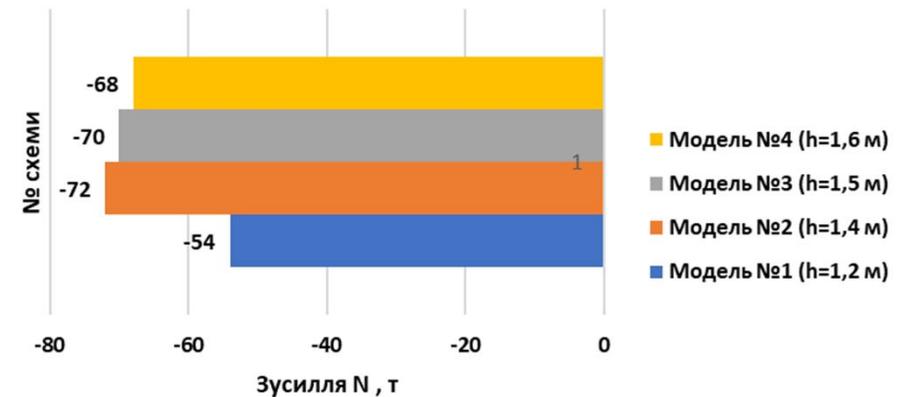
Максимальний граничний прогин для моделей оболонки становить:

Аналіз напруженого стану моделей, що досліджуються

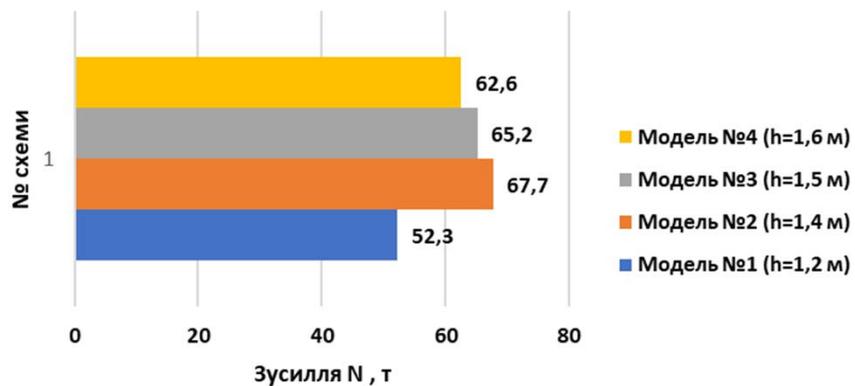
Зусилля N в стержнях поверхні сітчастої оболонки від PCH2



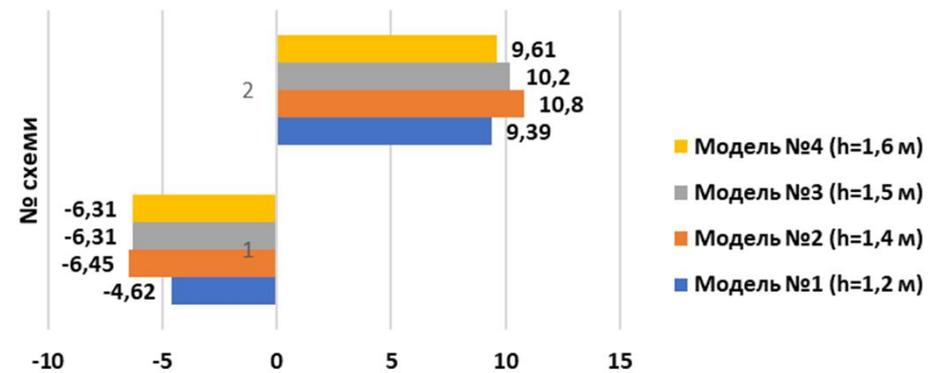
Зусилля стиску в стержнях верхнього поясу торцевої діафрагми



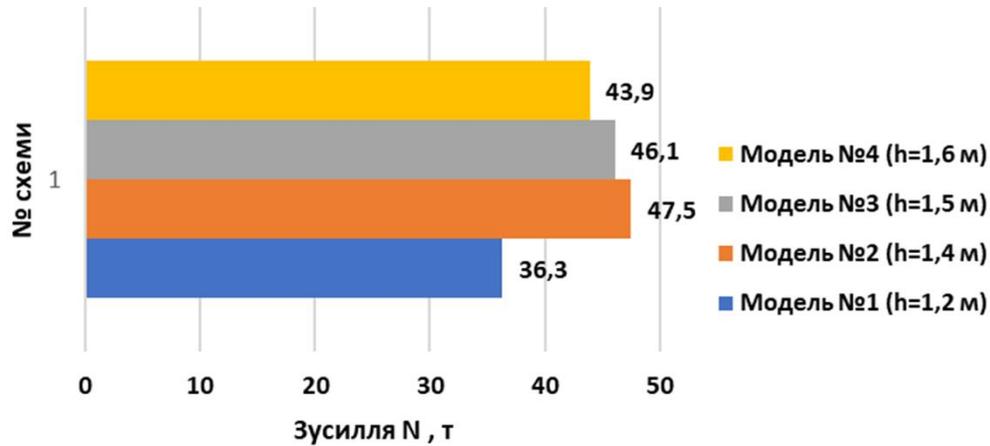
Зусилля стиску N нижнього поясу торцевої діафрагми



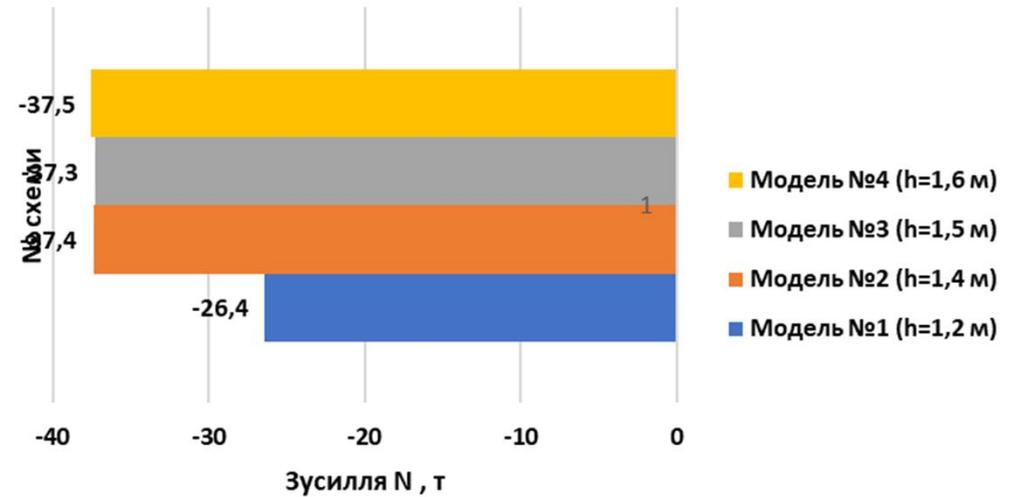
Зусилля розтягу N решітки поясу торцевої діафрагми



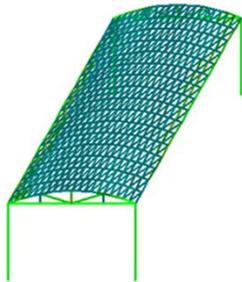
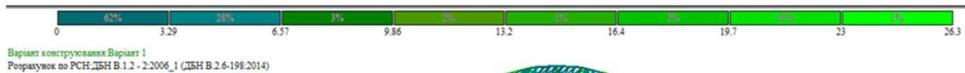
Зусилля розтягу N в стержнях бортового елемента



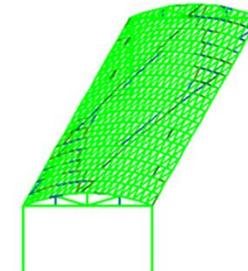
Зусилля стиску N в колоні



Мозаїка результатів для схеми №1: при розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності



Мозаїка результатів розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що є підібраними в модулі «Метал» - для схеми №1



Таблиця 6 – Максимальне використання, (%) перерізу після 1-ї ітерації, що призначені у вихідних даних

Назва конструктивної групи стержнів	Згідно перевірки за умовами 1ГС			
	Схема №1	Схема №2	Схема №3	Схема №4
Верхній пояс торцевої діафрагми жорстості	26,3	35,1	34,1	33,2
Нижній пояс торцевої діафрагми жорстості	25,5	33	31,8	30,6
Решітка торцевої діафрагми жорстості	19,3	22,2	21	19,7
Бортові елементи	18,3	24	23,2	22,1
Стержні поля оболонки	12,2	15,9	15,3	14,6
Колони	22,5	27,7	26,7	25

Очевидно, що найбільший % використання площі перерізу притаманний моделі №1

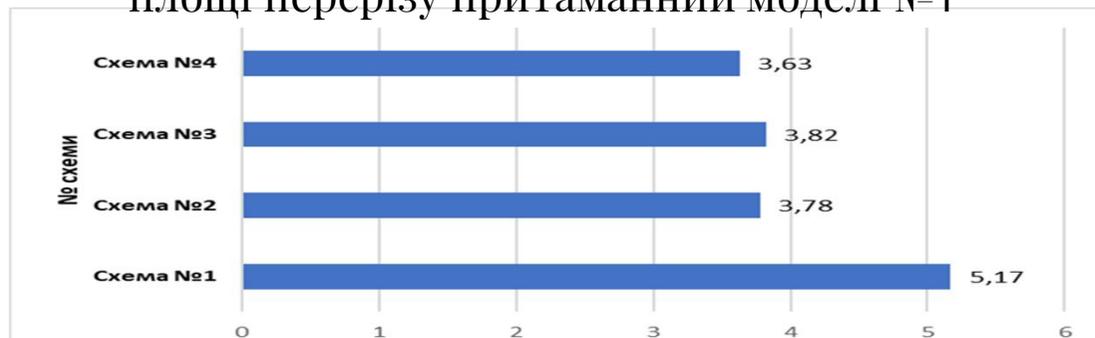
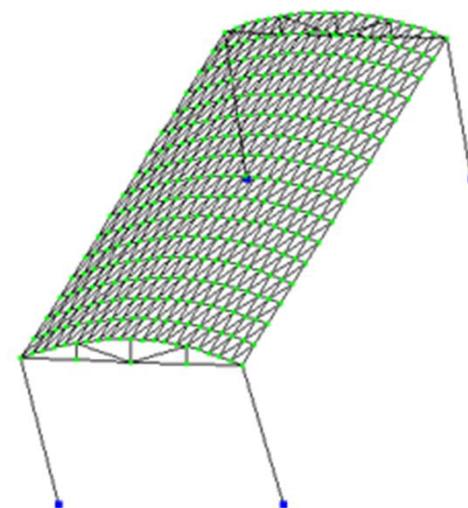


Рис.6. Форма втрати стійкості для моделі №1 (k=5,17)



Таблиця. 6.11 Коефіцієнти стійкості для моделей циліндричної оболонки, що досліджується

	Схема №1	Схема №2	Схема №3	Схема №4
k	5,17	3,78	3,82	3,63

Очевидно, що найбільшим запасом стійкості характеризується оболонка за моделлю №1, що має найменшу висоту -1,2 м

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

Таблиця 7. Підбір елементів верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості поясу після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага Ім.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 159*20	С235	ТБ 76*10	0,01627	11,686	0,19013122
2			ТБ 121*8	0,020985	12,436	0,260963
3			ТБ 83*14	0,023813	12,482	0,297238
3			ТБ 108*8,5	0,020849	12,546	0,261572

Таблиця 8. Підбір елементів нижнього поясу торцевої діафрагми жорсткості поясу після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага Ім.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 159*20	С235	ТБ 146*5	0,0173793	12	0,2085516
2			ТБ 159*6	0,02263	12	0,27156
3			ТБ 133*7	0,021743	12	0,260911
4			ТБ 159*5,5	0,020812	12	0,249744

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

Таблиця 9. Підбір елементів стержнів решітки торцевої діафрагми жорсткості поясу після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага Ім.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 76*10	С235	ТБ 50*2,8	0,0032579	20,352	0,06630559
2			ТБ 42*3	0,002884	19,9	0,057396
3			ТБ 50*3	0,003476	20,26	0,070421
4			ТБ 50*2,8	0,003258	20,94	0,068221

Таблиця 10. Підбір бортових елементів оболонки після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага Ім.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 325*8,5	С235	ТБ 114*4,5	0,012147	48	0,583056
2			ТБ 140*4,5	0,015031	48	0,721498
3			ТБ 140*4,5	0,015031	48	0,721498
4			ТБ 114*5,5	0,014711	48	0,706114

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

Таблиця 11. Підбір стержнів **криволінійної поверхні оболонки** 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 245*25	С235	ТБ 133*5	0,0157769	696,89	10,9947638
2			ТБ 168*8	0,031554	708,14	22,34451
3			ТБ 152*5,5	0,019863	708,83	14,07942
4			ТБ 133*6	0,018784	709,79	13,33298

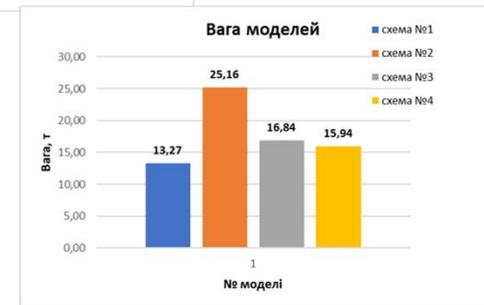
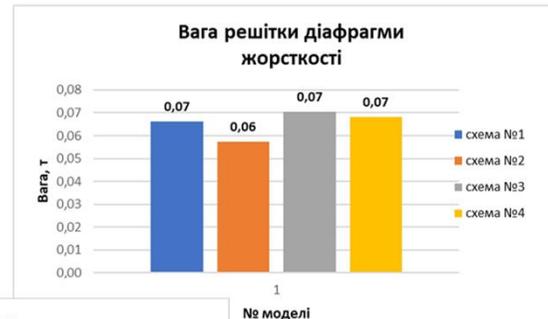
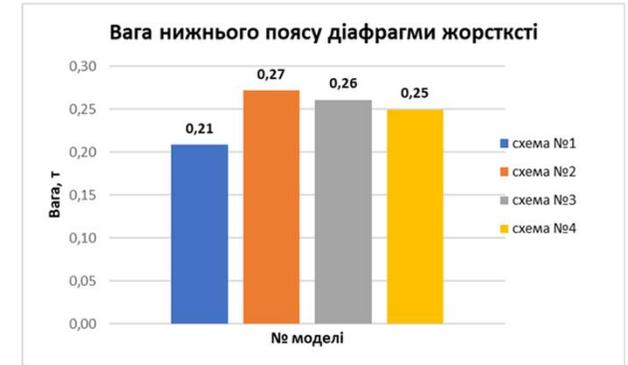
Таблиця 12. Підбір **колон** оболонки після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

№ схеми	Попередньо прийнятий профіль	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 273*40	С235	ТБ 273*6,5	0,0427025	28,8	1,229832
2			ТБ 273*8	0,052261	28,8	1,50512
3			ТБ 273*7,5	0,049087	28,8	1,413711
4			ТБ 273*7	0,045901	28,8	1,321949

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

Таблиця 13. Підрахунок ваги моделей циліндричної оболонки

Назва групи конструктивних елементів	Схема №1	Схема №2	Схема №3	Схема №4
Верхній пояс торцевої діафрагми жорсткості	0,19	0,26	0,30	0,26
Нижній пояс торцевої діафрагми жорсткості	0,21	0,27	0,26	0,25
Розкоси торцевої діафрагми жорсткості	0,07	0,06	0,07	0,07
Бортові елементи	0,58	0,72	0,72	0,71
Стержні криволінійної поверхні	10,99	22,34	14,08	13,33
Колони	1,23	1,51	1,41	1,32
Всього:	13,27	25,16	16,84	15,94



ВИСНОВКИ

1. Легкі сітчасті оболонки покриття, зокрема нульової Гаусової кривини, якими є циліндричні оболонки є ефективними конструкціями покриття, що дозволяють перекрити великі прольоти без улаштування додаткових опор.

2. Сітчасті стержньові оболонки є чутливими до зміни напружено-деформованого стану, що залежить від зміни будь-яких геометричних чи конструктивних параметрів.

3. Зміна стріли підйому оболонки при незмінності решти геометричних та конструктивних параметрів оболонки значним чином впливає на перерозподіл та зміну зусиль в стержневих елементах конструкції.

4. Діаграми на рис.6.4-6.9 свідчать, що найменші осьові зусилля розтягу-стиску виникають в усіх конструктивних групах елементів в схемі, що має найменше значення стріли підйому – 1,2 м (схема №1). Найбільші осьові зусилля виникають в конструктивних групах стержнів моделі №2 (стріла підйому становить 1,4 м).

5. Найбільш стійкою конструкцією оболонка за схемою №2 також, найменш стійкою є модель №4 з найбільшою стрілою підйому -1,6 м.

6. Максимальний % використання перерізу для всіх груп конструктивних елементів після першого ітераційного розрахунку притаманний також для моделі з найменшою висотою стріли підйому -1,2 м.

7. Для циліндричних сітчастих оболонок рекомендовано приймати стрілу підйому оболонки в межах $(1/15 \dots 1/20)l$, де l – проліт оболонки.

8. Статичний та конструктивний розрахунок виявили, що з-поміж моделей, що досліджувалися, найбільш ефективною за критерієм напружено-деформованого стану та ваги виявилася модель №1 зі стрілою підйому $f=(1/20)l$, тобто $f=1.2$ м.