

**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: «Дослідження роботи циліндричної стержньової  
оболонки покриття»

Виконав (ла)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Андрушечко Ю.О.

\_\_\_\_\_  
(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**

**Андрушечко Юрій Олегович**

**Тема роботи: Дослідження роботи циліндричної стержньової оболонки покриття**

Затверджено наказом по університету № \_\_\_\_\_ від "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2025р.

Строк здачі студентом закінченої роботи: "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2025 р.

Вихідні дані до роботи:

Конструктивне вирішення сітчастої циліндричної оболонки покриття

---

---

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

---

---

*Виконати огляд джерел щодо роботи під навантаженням покриттів типу оболонка (зокрема сітчастих конструкцій) Змодельовати розрахункові СЕ схеми, що мають однакові параметри та відрізняються лише стрілою підйому ( $h$  прийняти в допустимому діапазоні). Оцінити НДС для кожної моделі, показники стійкості, підібрати нові перерізи елементів. Обчислити вагу моделей, що розраховуються. 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)

В.М. Луцьковський

(Прізвище, ініціали)

**Завдання прийняв до виконання:**

**Здобувач**

(підпис)

Ю.О. Андрушечко

(Прізвище, ініціали)

## Анотація

**Андрушечко Юрій Олегович. Дослідження роботи циліндричної стержневої оболонки покриття – 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** дозволяють виявити з-поміж трьох моделей стержневих сталевих оболонок модель, що буде потребувати найменших витрат металу, тобто буде найлегшою.

**Аналіз публікацій та досліджень** встановив, що сітчасті циліндричні оболонки покриття є одними з найбільш ефективних конструктивних рішень для перекриття великих прольотів у будівлях та спорудах. Завдяки малій вазі, високій несучій здатності та економічності вони широко застосовуються в сучасному будівництві. У цьому огляді розглядаються основні етапи розвитку таких конструкцій, методи їхнього проектування та сучасні тенденції досліджень.

Сітчасті циліндричні оболонки покриття є перспективними та економічно ефективними конструкціями, що поєднують високу несучу здатність, малу вагу та естетичну привабливість. Сучасні дослідження спрямовані на покращення

методів розрахунку, впровадження інноваційних матеріалів та технологій, що дозволяє розширити сфери застосування таких конструкцій у будівництві.

В **основній частині** наведено опис трьох скінченоелементних схем сітчастої сталевій злегшеної циліндричній оболонки покриття з розміром в плані 6,0x12,0 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 ( $f_1=2,4$  м;  $f_2=2,0$  м ;  $f_3=1,6$  м), а решта геометричних та конструктивних параметрів залишаються незмінними.

В результаті статичного розрахунку порівняно показники напружено-деформованого стану трьох 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 циліндричній оболонки обчислено вагу кожної моделі.

У **висновках** встановлено, що при зміні величини стріли підйому змінюється напружений й деформований стержнів поля оболонки й інших конструктивних груп її елементів. Чим вища стріла підйому моделі, тим менш деформативною вона є й тим менше напруженою. І, навпаки, чим більше поверхня прямує до площини, тим більші зусилля виникають в елементах такої оболонки й тим більші прогини відзначаються в середині поля оболонки. Чим більше висота стріли підйому оболонки, тим вона є більш стійкою, хоча всі моделі, що досліджувалися, мають великий запас загальної стійкості. Загальна деформативність для всіх варіантів знаходиться в допустимих межах, тобто не перевищують гранично допустимого значення, обумовленого нормами. Вага

моделей №1 та №2 (із різницею їх стріли підйому в 0,5 м) виявилася майже однаковою, а вага моделі №3 - найбільшою. За критерієм матеріальної ефективності найбільш ефективною вважатимемо модель №2 з-поміж варіантів, які досліджувалися.

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

**Список публікацій** та/або виступів на конференціях студента:

Срібняк Н.М., Галушка С.А., Безсонов К.С., Андрущечко Ю.О. Ефективні сталеві конструкції для покриття будівель. Міжнародна науково-практична конференція «GLOBAL TRENDS IN SCIENCE AND EDUCATION» 10-12.03.2025 року Київ, Україна

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

**Структура роботи.** Робота складається з основного тексту на 50 сторінках, у тому числі 20 таблиць, 38 рисунків. Текст роботи містить 7 розділів, що включають загальну характеристику роботи й висновки, список з 33 джерел, 2 додатків на 38 сторінках. Графічна частина складається з 27 слайдів мультимедійної презентації.

### **Abstract**

**Andrushechko Yurii Olehovych. Research on the behaviour of a cylindrical core coating shell** – 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** allow us to identify the model that will require the least metal consumption, i.e., the lightest, among the three models of core steel shells

The **analysis of publications and research** has shown that mesh cylindrical roofing shells are one of the most effective structural solutions for covering large spans in buildings and structures. Due to their light weight, high load-bearing capacity and cost-effectiveness, they are widely used in modern construction. This review discusses the main stages of development of such structures, their design methods and current research trends.

Cylindrical mesh shells are promising and cost-effective structures that combine high load-bearing capacity, light weight, and aesthetic appeal. Modern research is aimed at improving calculation methods, introducing innovative materials and technologies, which allows expanding the scope of such structures in construction.

The **main part** describes three finite element diagrams of a mesh steel lightweight cylindrical cover with dimensions in plan

6.0x12.0 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 ( $f_1=2.4$  m;  $f_2=2.0$  m;  $f_3=1.6$  m), while the rest of the geometric and design parameters remain unchanged.

As a result of the static calculation, the stress-strain state of the three 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 when the value of the lifting boom changes, the stress and deformation of the core field of the shell and other structural groups of its elements change. The higher the lifting boom of the model, the less deformable it is and the less stressed it is. Conversely, the more the surface tends to the plane, the greater the forces in the elements of such a shell and the greater the deflections in the middle of the shell field. The greater the height of the lifting boom of the shell, the more stable it is, although all the models studied have a large margin of overall stability. The total deformability for all variants is within acceptable limits, i.e., they do not exceed the maximum permissible value specified by the standards. The weight of models No. 1 and No. 2 (with a difference of 0.5 m in their lifting boom) was almost the same, and the weight of model No. 3 was the highest. According to the criterion of material efficiency, model No. 2 is the most efficient among the variants studied.

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

**List of publications and/or presentations at student's conferences:**

Sribniak N.M., Halushka S.A., Bezsonov K.S., Andrushechko Yu.O. Efficient steel structures for building envelopes. International scientific and practical conference 'GLOBAL TRENDS IN SCIENCE AND EDUCATION' 10-12.03.2025 Kyiv, Ukraine

In the **appendices** you can find: conference abstracts, slide album of multimedia presentation.

**Structure of the manuscript.** The **manuscript** consists of the main text on 50 pages, including 20 tables and 38 figures. The text of the work contains 7 chapters, including a general description of the work and conclusions, a list of 33 references, 2 appendices on 38 pages. The graphic part consists of 27 slides of a multimedia presentation.

# ЗМІСТ

*Завдання*

*Анотація*

## **РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА**

**РОБОТИ**..... 1

1.1 Актуальність теми..... 1

## **РОЗДІЛ 2. БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ**..... 3

2.1 Історичний розвиток сітчастих циліндричних оболонок..... 4

2.2 Методи розрахунку та проектування сітчастих оболонок..... 5

2.3 Сучасні наукові дослідження роботи оболонок..... 6

## **РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В РОБОТІ**..... 7

### **РОЗДІЛ.4 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЦИЛІНДРИЧНІ ОБОЛОНКИ**

**ПОКРИТТЯ**..... 11

4.1 Формоутворення циліндричної оболонки..... 11

4.2 Типи циліндричних оболонок..... 12

### **РОЗДІЛ.5 СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНІ МОДЕЛІ ЦИЛІНДРИЧНИХ**

**СІТЧАСТИХ ОБОЛОНОК**..... 14

5.1 Алгоритм проведення числових розрахунків..... 14

5.2 Скінченоелементні моделі сітчастих оболонок..... 17

5.2.1 Побудова геометрії оболонки способом трансляції твірної..... 19

5.3 Параметри жорсткості..... 20

5.4 Граничні умови та навантаження ..... 22

### **РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИЧНОГО**

**РОЗРАХУНКУ** ..... 24

6.1 Деформативність розрахункових моделей ..... 25

6.2 Напружений стан моделей, що досліджуються..... 28

6.3 Аналіз стійкості моделей, що досліджуються..... 42

6.4 Визначення нових перерізів стрижнів..... 44

**ВИСНОВКИ**..... 50

**Додатки**

*Додаток 1. Графічний матеріал (презентація)*

*Додаток 2 Апробація результатів дослідження*

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

#### 1.1 Актуальність теми

Сітчасті циліндричні оболонки – це ефективні конструкції, що поєднують високу міцність, малу вагу та економічність матеріалів. Завдяки своїй геометрії та сітчастій структурі вони здатні рівномірно розподіляти навантаження, забезпечуючи стійкість до зовнішніх впливів, зокрема вітрових і сейсмічних навантажень.

Основна перевага таких оболонок – оптимальне використання матеріалу. Сітчаста структура дозволяє зменшити вагу конструкції без втрати несучої здатності, що робить їх ідеальними для великих прольотів та архітектурно складних споруд. Крім того, вони мають високу жорсткість і можуть працювати в умовах значних навантажень, зберігаючи форму та цілісність.

Завдяки цим характеристикам сітчасті циліндричні оболонки широко застосовуються у будівництві мостів, ангарів, спортивних арен, виставкових центрів та інших об'єктів, де важлива легкість, надійність і економічність.

Класифікувати циліндричні оболонки можна за декількома ознаками. Для стержньових оболонок (сітчастих) важливим критерієм є те, скільки шарів містить оболонка.

Так, для перекриття малих прольотів (6–24 м) слід використовувати циліндричні оболонки більш простої конструкції – тобто із розташуванням решітчастої системи поля оболонки (її поверхні) в один шар. Більші прольоти – середні та великі потребують використання більш масивних оболонок із конструюванням двошарового поля оболонки. Тобто стержньова система поля оболонки складається не з одного шару стержнів, а з двох (нижнього та верхнього). Верхній та нижній шари з'єднуються системою вертикальних та похилих стержнів (решітки).

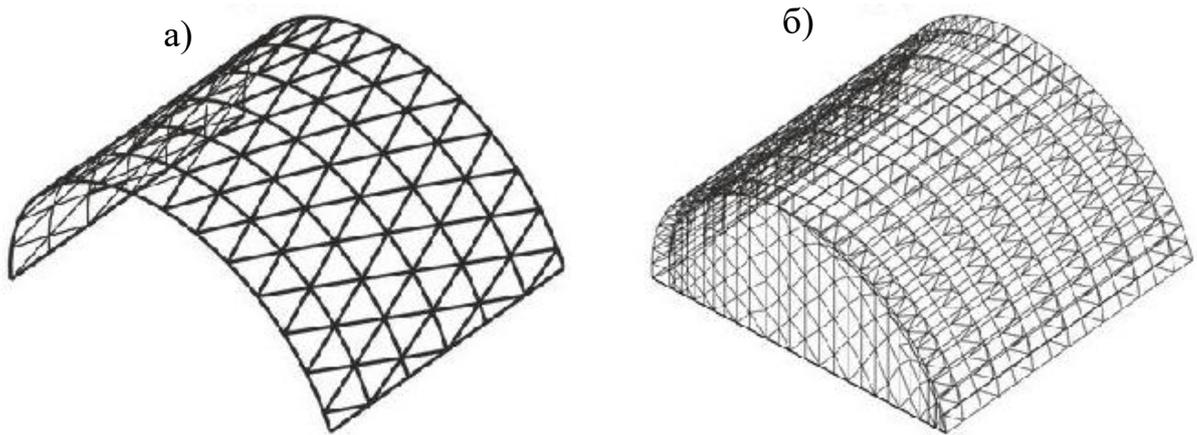


Рис. 1.1 Одношарова циліндрична оболонка (проліт 6-24 м)-а; двошарова циліндрична оболонка (проліт 25-80 м) -б

**Метою** дослідницької роботи є оцінка напружено-деформованого стану, стійкості та матеріалоемності трьох моделей сітчастих металевих оболонок покриття циліндричної форми, що відрізняються одна від одної лише висотою стріли підйому. Кінцевою метою є виявлення моделі, що буде мати найменшу вагу.

**Задачі** дослідницької роботи:

- ознайомитися з існуючими конструктивними рішеннями сітчастих оболонок; ознайомитися з методами, принципами створення скінченоелементних моделей сітчастих циліндричних оболонок використовуючи МСЕ;
- в середовищі ПК Ліра-САПР змодельовати три скінченоелементні стержньові моделі циліндричних оболонок з однаковими розмірами в плані, параметрами жорсткості, параметрами навантаження та граничними умовами. Відмінною в цих моделях буде лише величина стріли підйому оболонки.
- виконати статичний розрахунок моделей в пружній стадії роботи;
- виконати оцінку та порівняння параметрів напружено-деформованого стану конструктивних груп елементів оболонок, параметрів стійкості

- оцінити ступінь використання площі попередньо прийнятих перерізів оболонок. Прийняти нові профілі елементів для у всіх конструктивних груп стержнів.
- з урахуванням ваги нових профілів елементів визначити вагу кожної моделі. Зробити висновки щодо матеріалоемності кожної моделі.

**Об'єкт дослідження** – варіанти (СЕ схеми) трьох сітчастих оболонок циліндричного типу, що мають різну стрілу підйому.

**Предметом дослідження** виступають зусилля в стержнях СЕ моделей, переміщення вузлів СЕ моделей, параметри стійкості, ступінь використання попередньо прийнятих трубчастих перерізів, а також матеріалоемність моделей.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

Результати розрахунків дозволяють виявити з-поміж трьох моделей стержневих сталевих оболонок обрати модель, що буде потребувати найменших витрат металу, тобто буде найлегшою.

#### **Апробація результатів дослідження**

Срібняк Н.М., Галушка С.А., Безсонов К.С., Андрушечко Ю.О. Ефективні сталеві конструкції для покриття будівель. Міжнародна науково-практична конференція «GLOBAL TRENDS IN SCIENCE AND EDUCATION» 10-12.03.2025 року Київ, Україна

## **РОЗДІЛ 2**

### **БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ**

Сітчасті циліндричні оболонки покриття є одними з найбільш ефективних конструктивних рішень для перекриття великих прольотів у будівлях та спорудах. Завдяки малій вазі, високій несучій здатності та економічності вони широко застосовуються в сучасному будівництві. У

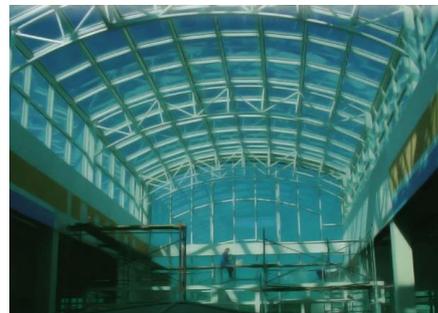
цьому огляді розглядаються основні етапи розвитку таких конструкцій, методи їхнього проектування та сучасні тенденції досліджень.

## **2.1 Історичний розвиток сітчастих циліндричних оболонок**

Дослідження та практичне застосування сітчастих оболонкових конструкцій почалися у ХХ столітті з появою нових будівельних матеріалів та методів розрахунку. Піонерами у цій галузі були інженери та вчені, які розробили теоретичні основи тонкостінних оболонкових конструкцій. Значний внесок у вивчення напружено-деформованого стану таких конструкцій зробили роботи Власова В.З., Тимошенка С.П. та Флоппа Р., які заклали основу для аналізу напружень у криволінійних конструкціях.

У другій половині ХХ століття, завдяки розвитку числових методів розрахунку, зокрема методу скінченних елементів (МСЕ), стало можливим більш детальне моделювання поведінки сітчастих оболонок під різними навантаженнями. У цей період з'явилися як фундаментальні, так і прикладні дослідження, присвячені оптимізації геометричних параметрів таких конструкцій [5-22 ], а також методам їхнього зведення та експлуатації.

У ХХІ столітті сітчасті оболонки стали одним із основних засобів формоутворення в сучасній авангардній архітектурі, зокрема у проектуванні хмарочосів та споруд у стилі «хай-тек» (рис. 2.1). На сьогоднішній день вони поступово витісняють залізобетонні несучі оболонки з будівельної практики.



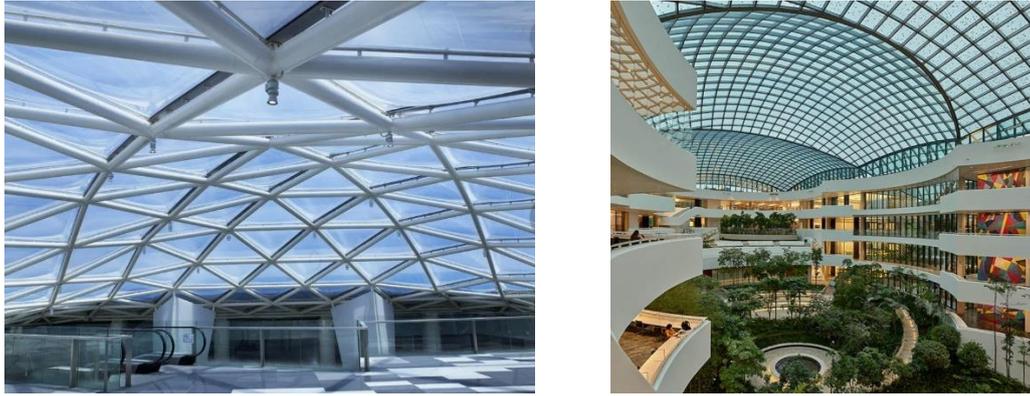


Рис. 2.1 Сучасні сітчасті оболонки в стилі «хай-тек»

## 2.2 Методи розрахунку та проєктування сітчастих оболонок

Розрахунок сітчастих циліндричних оболонок базується на теорії тонкостінних конструкцій та використанні чисельних методів. Сучасні дослідження у цій галузі здебільшого зосереджені на наступних аспектах:

- *Методи статичного аналізу.* Традиційно використовується метод сил та метод переміщень, однак найбільш поширеним підходом став метод скінченних елементів, який реалізований у програмних комплексах Lira-SAPR, ANSYS, Abaqus тощо.
- *Врахування нелінійності матеріалу та геометрії.* Багато сучасних досліджень приділяють увагу нелінійному аналізу конструкцій, що дозволяє більш точно прогнозувати їхню поведінку під дією змінних навантажень.
- *Оптимізація форми та параметрів сітчастих оболонок.* Використання алгоритмів топологічної оптимізації дозволяє зменшити вагу конструкції при збереженні її міцності та жорсткості.
- *Дослідження несучої здатності при динамічних впливах.* Умови експлуатації таких конструкцій передбачають необхідність врахування вітрових, сейсмічних та інших динамічних навантажень.

Сучасні тенденції та перспективи досліджень

З розвитком технологій будівельного виробництва та зростанням вимог до ефективності будівельних конструкцій дослідження сітчастих оболонок спрямовані на наступні **напрями**:

1. *Використання нових матеріалів.* Легкі високоміцні сталі, алюмінієві сплави та композитні матеріали дозволяють зменшити вагу конструкцій, підвищуючи їхню довговічність.
2. *Застосування адаптивних конструкцій.* Сучасні технології дозволяють створювати оболонки зі змінною геометрією, що адаптуються до змінних навантажень.
3. *Інтеграція з цифровими технологіями.* BIM-технології та параметричне моделювання дають змогу значно скоротити час проектування та підвищити точність розрахунків.
4. *Екологічна ефективність.* Оптимізація матеріалів і конструктивних рішень сприяє зниженню вуглецевого сліду та підвищенню енергоефективності будівель.

Отже, сітчасті циліндричні оболонки покриття є перспективними та економічно ефективними конструкціями, що поєднують високу несучу здатність, малу вагу та естетичну привабливість. Сучасні дослідження спрямовані на покращення методів розрахунку, впровадження інноваційних матеріалів та технологій, що дозволяє розширити сфери застосування таких конструкцій у будівництві.

### **2.3 Сучасні наукові дослідження роботи оболонок**

В [23] описано згинання тонких циліндричних елементів оболонок. В дослідженні J.-C. Debus наведено скінченноелементний аналіз згинальних коливань ортогонально жорстких циліндричних оболонок за допомогою АТІЛА [24].

В роботі [25] аналізується міцність на вигин тонкостінних циліндричних оболонок з недосконаlostями у пружно-пластичному діапазоні, а також демонструється, як крива несучої здатності нових норм [33] може забезпечити точний і безпечний опис їхньої поведінки.

Дослідники [26] вивчали поведінку та руйнування одношарових циліндричних сітчастих оболонок під навантаженням за допомогою

експериментальних досліджень. У роботі [27] представлено результати експериментального та числового аналізу механізму втрати стійкості та опору навантаженню ромбічних сітчастих гіперболоїдних сітчастих оболонок з ромбічною формою сітки.

Пошук оптимальної форми сітки поля оболонки та етапи її оптимізації наведено в роботі [28]. Аналіз формоутворення й параметрів стійкості циліндричної сітчастої оболонки, підсиленої одношаровими решітчастими мембранними конструкціями, представлено в [29].

В роботі [30] наведено способи генерації сітки поверхні, що має кривину й описано послідовність етапів математичного моделювання криволінійної поверхні довільної складної форми.

### РОЗДІЛ 3

#### МЕТОДИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В РОБОТІ

Методи дослідження, насамперед, обумовлений метою роботи й задачами дослідження. Серед можливих методів слід виділити наступні: метод аналізу інформації, числовий метод математики – метод скінчених елементів; метод опрацювання інформації за допомогою програмного забезпечення.

1) **Метод аналізу інформації.** Включає в себе пошук, класифікацію, аналіз інформації із різних джерел. В результаті аналізу передбачається зробити певні висновки щодо формулювання проблеми дослідження, його мети та задач. Серед таких методів можна виділити документальні методи, що включають в себе:

- аналіз літератури та інтернет-джерел (дослідження наукових статей, монографій, дисертацій);
- веб-аналітика (збір і обробка інформації з онлайн-ресурсів);

## **2) Метод скінчених елементів**

Метод скінченних елементів (МСЕ) є одним із найефективніших числових методів розрахунку будівельних конструкцій, включаючи сітчасті стержньові оболонки. Його використання дозволяє детально аналізувати напружено-деформований стан складних конструкцій, прогнозувати їхню поведінку під різними видами навантажень і оптимізувати проєктні рішення.

МСЕ базується на дискретизації конструкції – поділі її на окремі елементи (скінченні елементи), які взаємодіють між собою у вузлах. Для кожного елемента формується система рівнянь рівноваги, що враховує деформації, переміщення та внутрішні зусилля. Далі рівняння для всіх елементів об'єднуються в загальну систему, яка розв'язується числовими методами.

У випадку сітчастих стержньових оболонок кожен стержень моделюється у вигляді стрижневого елемента загального виду (СЕН№10 в ПК Ліра-САПР), що працює на розтяг, стиск і згин. Вузли конструкції обумовлюють напрямки можливих деформацій та ступінь деформативності будівельної системи.

*Основні етапи розрахунку сітчастих оболонок за методом скінченних елементів.*

- *Створення геометричної моделі* – визначення форми оболонки, розташування вузлів і елементів.
- *Вибір типу скінченних елементів* – найчастіше застосовуються стержневі (балкові) елементи, що дозволяють моделювати тонкостінні просторові структури.
- *Задання матеріалів і фізичних параметрів* – визначення характеристик сталі, модуля пружності, коефіцієнта Пуассона тощо. Призначення параметрів матеріалу конструкції (сталі) метою подальшого конструктивного розрахунку.

- *Визначення граничних умов* – фіксація опор, обмеження переміщень та врахування контактних зв'язків.
- *Застосування навантажень* – моделювання власної ваги, снігового, вітрового та експлуатаційного навантажень.
- *Розв'язання системи рівнянь* – числове рішення з використанням матричних методів і алгоритмів ітераційного наближення.
- *Аналіз отриманих результатів* – оцінка напружень (зусиль), переміщень, параметрів стійкості та критичних точок конструкції.  
*Переваги методу скінченних елементів у розрахунку сітчастих оболонок*
- *Точність і гнучкість* – можливість моделювання конструкцій будь-якої складності з урахуванням їхніх особливостей.
- *Урахування нелінійності* – здатність враховувати великі деформації, пластичні властивості матеріалу та початкові недосконалості.
- *Оптимізація конструкції* – можливість мінімізувати матеріаломісткість, зберігаючи необхідну міцність і жорсткість.
- *Візуалізація результатів* – завдяки сучасному програмному забезпеченню (Lira-SAPR, Ansys, Abaqus тощо) можна отримати графічні моделі напружено-деформованого стану.

## **2) Конструювання елементів за будівельними нормами проектування**

Програмний комплекс ЛІРА-САПР є одним із найпоширеніших інструментів для розрахунку та проектування металевих конструкцій. Однією з його ключових можливостей є автоматизований підбір сталевих перерізів у модулі "Метал", що дозволяє оптимізувати конструкцію відповідно до нормативних вимог та забезпечити ефективне використання матеріалу.

Модуль "Метал" виконує підбір профілів відповідно до будівельних норм [1, 31,32] тощо. Основні критерії підбору:

- **Перевірка несучої здатності** – забезпечення достатньої міцності для сприйняття розрахункових навантажень.
- **Перевірка жорсткості** – обмеження прогинів і деформацій, щоб конструкція не втрачала експлуатаційних властивостей.
- **Перевірка стійкості** – контроль втрати стійкості через поздовжній згин, місцеву або загальну втрату стійкості.
- **Оптимізація перерізу** – підбір найменшого профілю, що відповідає всім вимогам, з метою економії матеріалу.

Як результат, для кожного елемента формується список допустимих профілів, з яких обирається оптимальний. Модуль "Метал" у ПК ЛІРА-САПР є потужним інструментом для автоматизованого підбору сталевих перерізів у процесі проєктування конструкцій. Використання цього модуля дозволяє підвищити точність розрахунків, зменшити трудомісткість процесу і забезпечити економічно обґрунтоване використання сталі.

## 5. Аналітична обробка результатів числового розрахунку за допомогою Microsoft Excel

Це невід’ємний етап проєктування. Microsoft Excel — потужний інструмент для роботи з числовими масивами, статистичної обробки даних та візуалізації результатів. Завдяки широкому набору функцій Excel дозволяє виконувати складні обчислення, аналізувати великі об’єми інформації та будувати графіки різного типу.

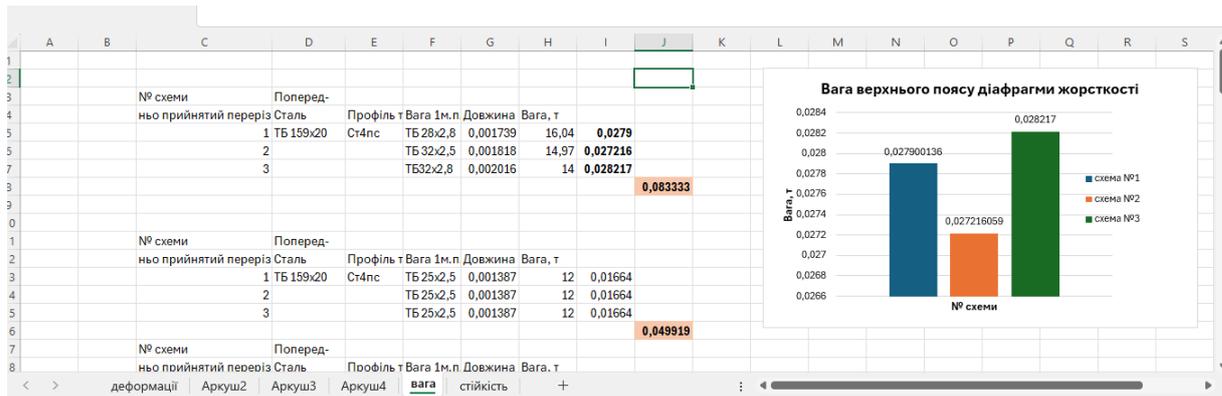


Рис. 3.1 Скрін із поля ПК Microsoft Excel, де відбувається підрахунок ваги конструктивних груп стержнів моделей циліндричної оболонки, що досліджується

## РОЗДІЛ 4

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЦИЛІНДРИЧНІ ОБОЛОНКИ ПОКРИТТЯ

#### 4.1 Формоутворення циліндричної оболонки

Форма циліндричної оболонки покриття, що використовується в будівництві, належить до поверхонь нульової гаусової кривини. Тобто, якщо розглядати циліндричну поверхню, то кривина її буде присутня лише в одному напрямку (в напрямку твірної, див. рис.4.1), за іншим же напрямком – кривина відсутня. Така природа поверхні обумовлена способом її формування. Оскільки у кожній точці поверхні кривина присутня лише в одному напрямку, а в іншому відсутня, добуток кривизни твірної на нуль призводить до нульового значення. Внаслідок цього циліндричні поверхні також класифікуються як поверхні з *нульовою гаусовою кривиною*.

Форма поверхні утворюється трансляційним методом (способом переносу) однієї кривої-твірної (як правило параболи) по двом паралельним прямим лініям – *направляючим*. Також формоутворення циліндричної поверхні можна уявити як обертання деякого відрізка прямої навколо деякої осі (рис.4.1).



Рис.4.1 Принципи формоутворення циліндричної оболонки

## 4.2 Типи циліндричних оболонок

На рис.4.2 наведено найпоширеніші типи оболонок циліндричної форми.

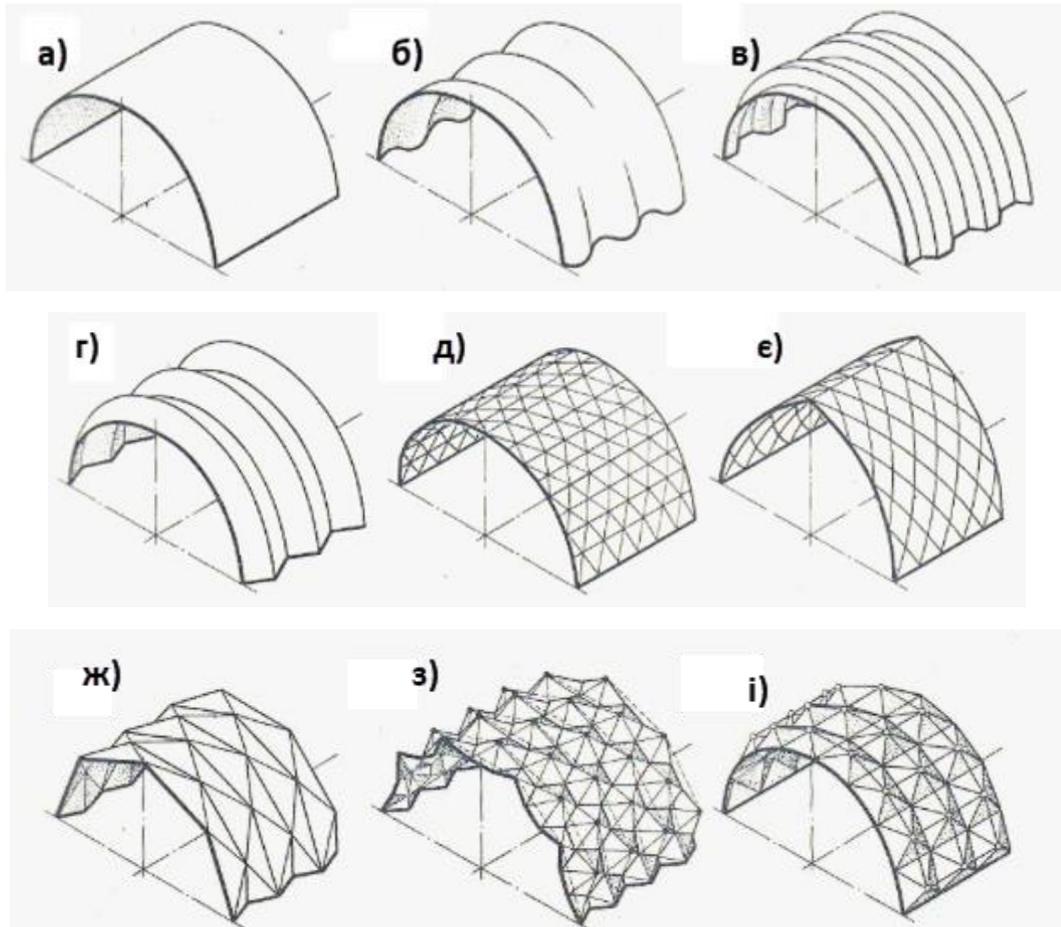


Рис. 4.2 Основні типи циліндричних склепінь (коротких оболонок):

гладкий—*а*; хвилястий—*б, в*; складчасті—*г*; сітчасті— *д, е*;

подвійноскладчастий — *ж*; структурні — *з, і*

Залежно від співвідношення прольоту до ширини, оболонки поділяються на довгі та короткі.

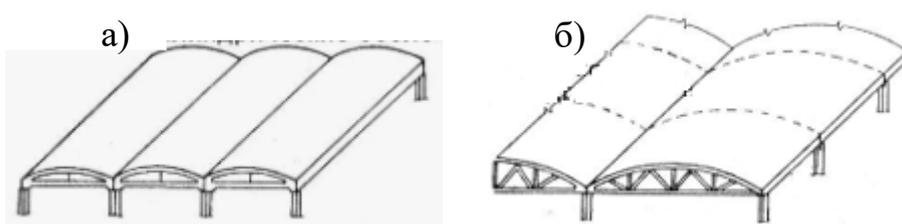


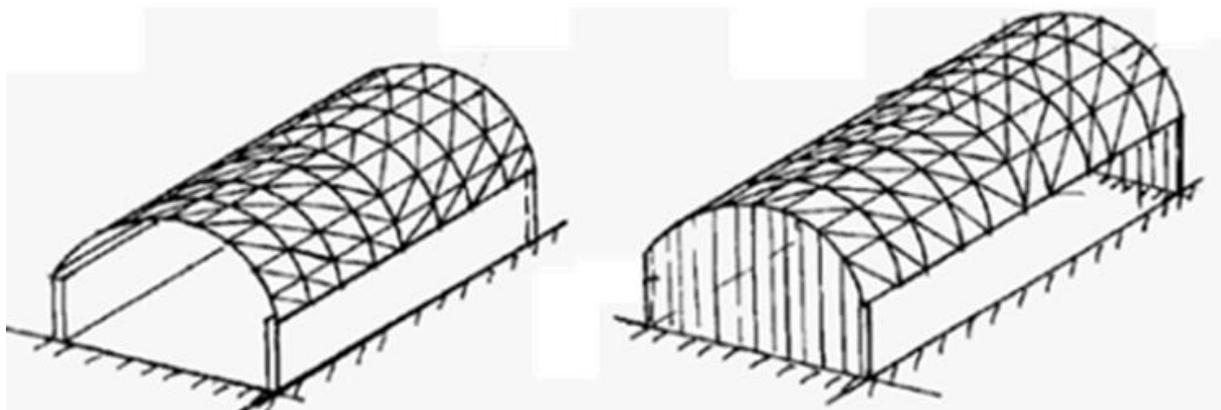
Рис. 4.3 Циліндричні оболонки: довгі-*а*; короткі-*б*

Довгими циліндричними оболонками вважають конструкції, у яких довжина суттєво перевищує радіус кривизни ( $L/R > 10$ ). Вони використовуються у випадках, коли необхідно перекрити великі прольоти або створити трубо- або аркоподібні покриття. До переваг цього типу оболонок слід віднести: високу несучу здатність при порівняно малій товщині матеріалу; ефективний розподіл навантажень уздовж осі; стійкість до навантажень, що викликають вигин. Серед недоліків слід відмітити здатність до втрати як місцевої, так і загальної стійкості; необхідність влаштування додаткових елементів жорсткості (у випадку тонкостінних циліндричних оболонок – це ребра жорсткості, що підсилюють тонкостінну шкарлупу).

Короткі оболонки мають співвідношення довжини до радіуса  $L/R < 5$ . Вони більш жорсткі та менш схильні до втрати стійкості. Серед переваг цього типу оболонок можна перелічити наступне: підвищена жорсткість і менша схильність до вигину; вони є більш простими у виготовленні та монтажу ніж довгі циліндричні оболонки; вони є більш стійкими до локальних навантажень.

Отже, довгі оболонки ефективні для перекриття (покриття) великих просторів, а короткі — для конструкцій, що працюють під великим тиском або значним навантаженням.

На рис. 4.4 наведено найбільш поширені конструктивні вирішення одношарових сітчастих циліндричних оболонок.



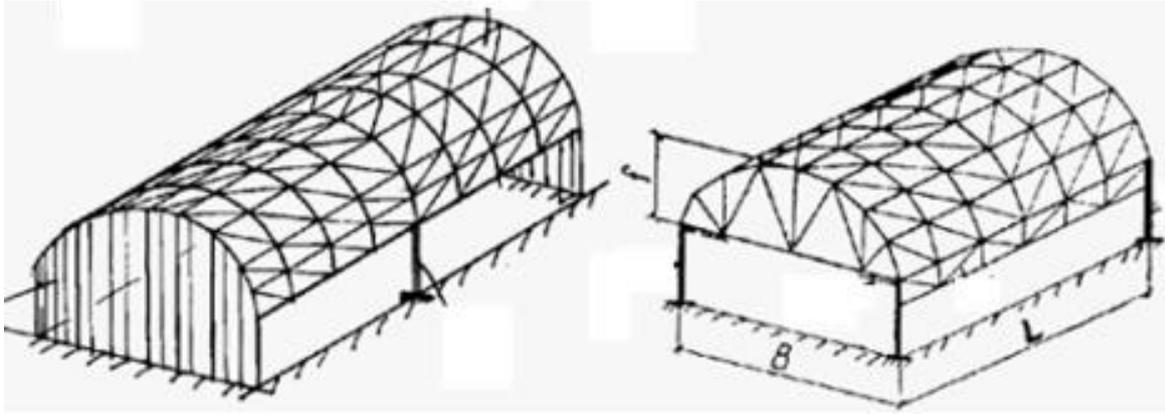


Рис. 4.4 Приклади можливих геометричних та конструктивних вирішень сітчастих циліндричних оболонок

## РОЗДІЛ 5

### СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНІ МОДЕЛІ ЦИЛІНДРИЧНИХ СІТЧАСТИХ ОБОЛОНОК

#### 5.1 Алгоритм проведення числових розрахунків

На першому етапі планується створити три скінченоелементні моделі (рис.5.1).

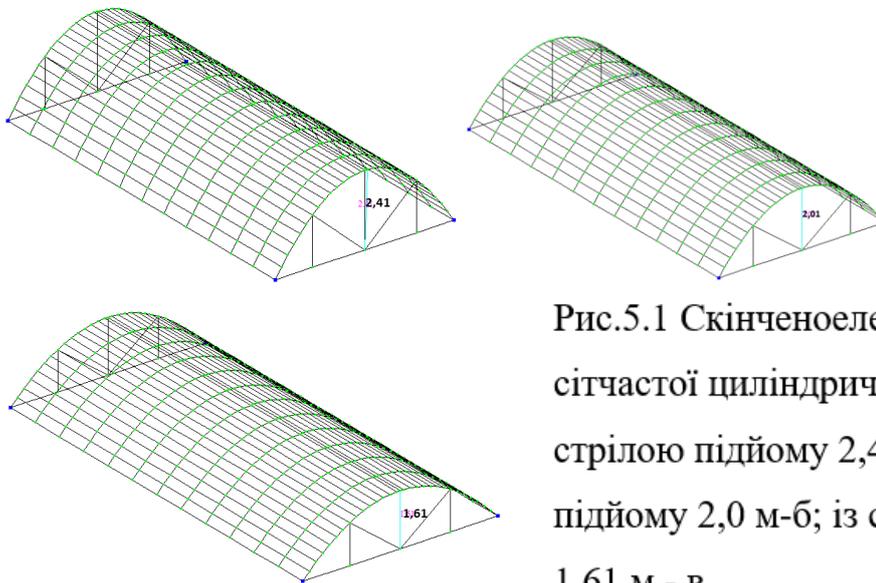


Рис.5.1 Скінченоелементні моделі сітчастої циліндричної оболонки: із стрілою підйому 2,41 м-а; із стрілою підйому 2,0 м-б; із стрілою підйому 1,61 м - в

На рис.5.1 наведено алгоритм (покроковий план дослідження) моделей сітчастих циліндричних оболонок.

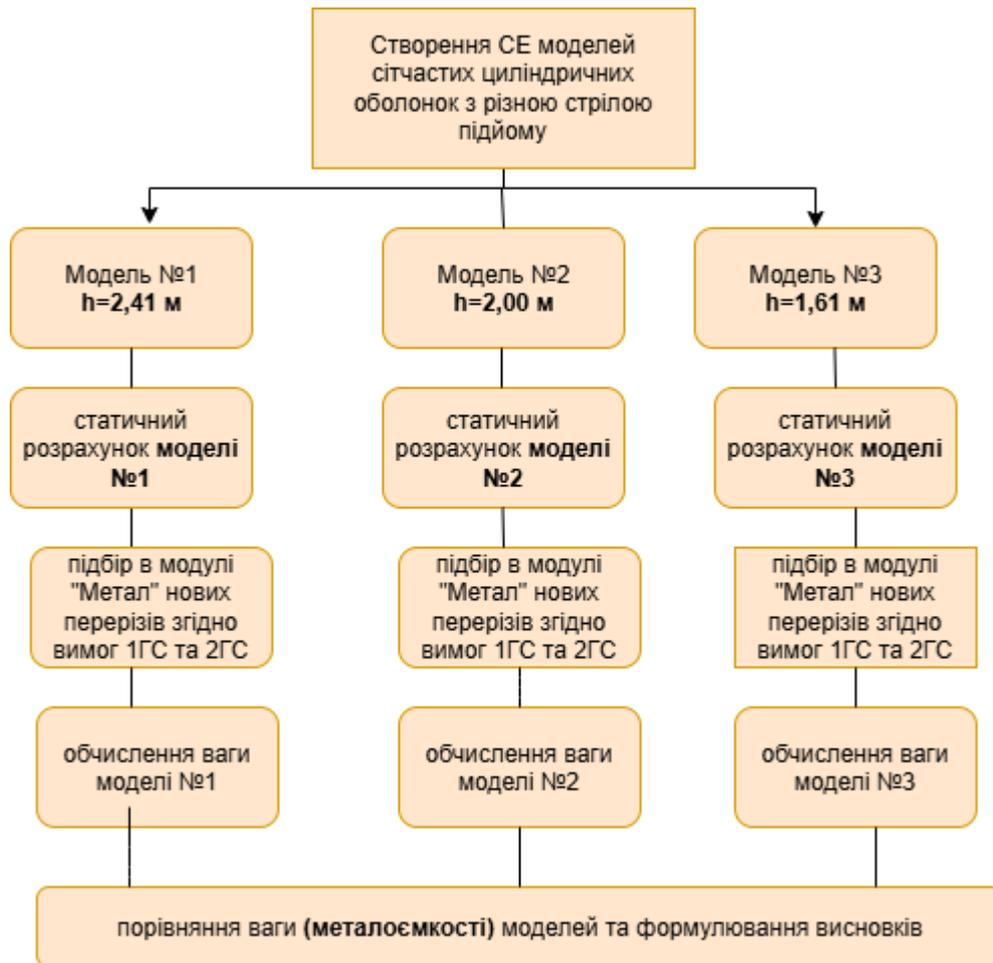


Рис. 5.2 Алгоритм виконання числового експерименту

Після створення геометрії моделей їм призначають параметри жорсткості елементів, завдають граничні умови, а також обчислюють на прикладають завантаження на поле конструкції. Всі вищезазначені параметри трьох СЕ моделей циліндричних стержньових (сітчастих) оболонок залишаються незмінними. Моделі, що прийнято до розрахунку відрізняються лише одним геометричним параметром - висотою оболонки (стрілою її підйому). Після призначення всіх вищезазначених необхідних характеристик та параметрів розрахункових моделей виконаємо їх статичний розрахунок, тобто від найнесприятливішого сполучення навантажень (РСН) визначимо зусилля в стержнях моделей та вертикальні переміщення вузлів.

Окрім того, оскільки, значна кількість стержнів конструкції працює на стиск треба оцінити стійкість під навантаженням конструкцій. Оскільки

настання граничного стану 1-ї групи може мати місце через втрату стійкості конструкції, а не через руйнування перерізів стержнів.

В модулі «Метал» є можливість оцінити, наскільки ефективно були призначені первинні жорсткості стержнів й оцінити відсоток використання площі поперечного перерізу стержнів в СЕ моделях. Тобто оцінити, наскільки стержні є напруженими.

Також в цьому модулі є можливість за даними конструктивного розрахунку згідно норм [1] підібрати й призначити нові жорсткості (нові профілі труб). Нові профілі забезпечуватимуть максимально ефективно використання площі поперечних перерізів.

Згідно нових підібраних профілів обчислимо вагу кожної СЕ моделі циліндричної оболонки та зробимо висновок про матеріалоємність кожної моделі.

Саме за методикою РСН плануються від найнесприятливішої комбінації завантажень (РСН2) визначити зусилля в стержнях, переміщення вузлів, виявити форму втрати стійкості та коефіцієнт стійкості.

Розрахункові сполучення навантажень

Номер таблиці РСН: 1

Ім'я таблиці РСН: ДБН В.1.2 - 2:2006\_1

ДБН В.1.2 - 2:2006

Коеф. надійності за відповідальністю:

для I-го ГС	1
для II-го ГС	1
для аварійних сполучень	1

У розрахунковій схемі задані:

розрахункові навантаження

нормативні навантаження

Не враховувати сейсміку для II-го ГС

Не враховувати особливе завантаж. для II-го ГС

N завантаж.	Найменування	$\gamma_{fm} / \gamma_{fe}$	$P q / P ch$	1.PCH1	2.PCH2	3.PCH3
1	Завантаження 1 (власна вага)	1.1	1.0	1.	1.	1.
2	Завантаження 2 (покрівля)	1.1	1.0	1.	1.	1.
3	Завантаження 3 (сніг)	1.0	0.35	0.	1.	0.9

1. основне

2. основне

Аварійне (С)

Аварійне (Б/С)

Додати

Коефіцієнти

Рис. 5.3 Діалогове вікно для призначення параметрів статичного розрахунку за РСН

## 5.2 Скінченоелементні моделі сітчастих оболонок

Розміри оболонки в плані становлять 6x12 м. На рис.5.4 наведено просторову модель циліндричної оболонки на прикладі моделі №1 ( $h=2,4$  м)

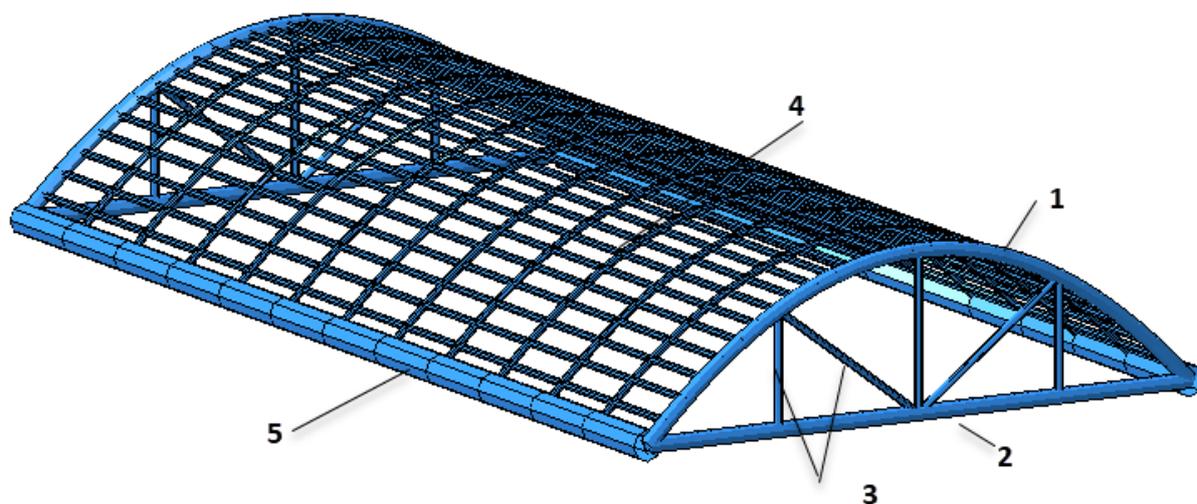


Рис. 5.4 Просторова модель циліндричної стержньової оболонки на прикладі моделі №1: стержні верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості -1; стержні нижнього поясу торцевої діафрагми жорсткості -2; стержні решітки торцевої діафрагми жорсткості-3; стержні поля оболонки -4; бортові елементи-5

Згідно рис. 5.4 для зручності роботи в подальшому всі стержні скінченоелементної схеми оболонки слід віднести до певних конструктивних груп стержнів, яким буде призначена жорсткість (призначено прокатний профіль згідно сортаментів, що діють):

- Стержні верхнього поясу, що окреслені за криволінійною параболічною кривою;
- Стержні нижнього поясу торцевої діафрагми жорсткості (затяжка) ;
- Стержні решітки торцевої діафрагми жорсткості;
- Стержні, що утворюють криволінійну циліндричну поверхню;

- Бортові елементи жорсткості

Оболонка прийнята одношаровою сітчастою. Тип решітки поля прийнято за першим прямокутним типом (рис.5.1, 5.4), що відповідає формоутворенню самої поверхні – способом перенесення плоскої кривої твірної по двом паралельним прямим- направляючим.

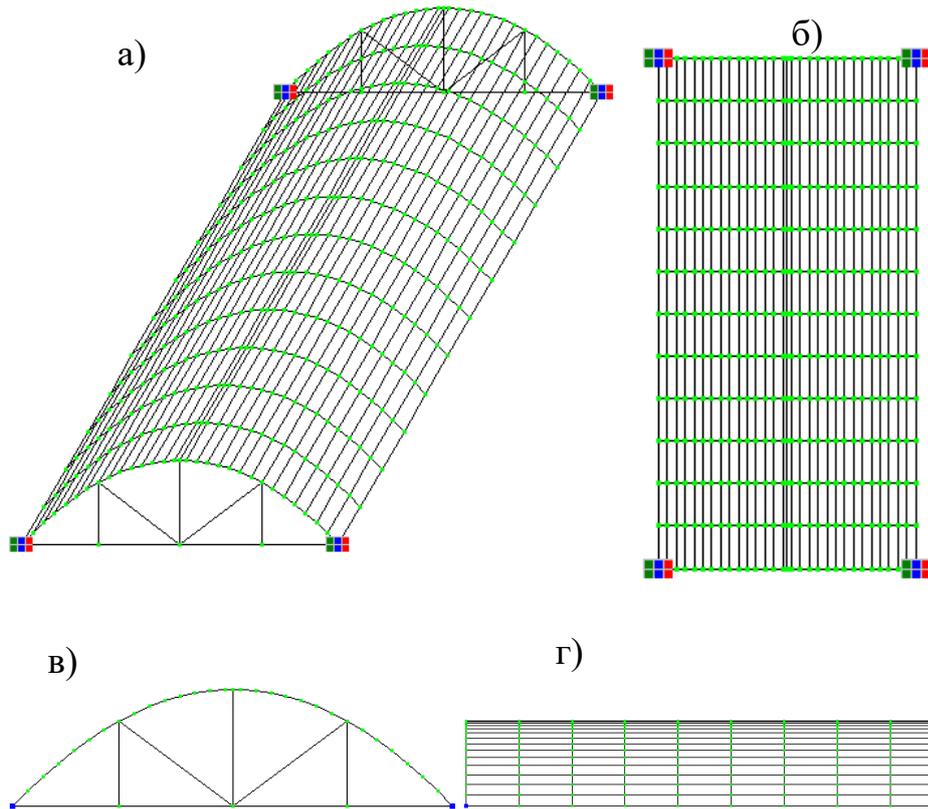
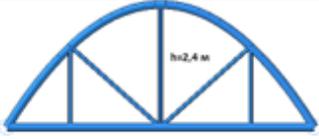
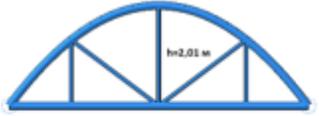
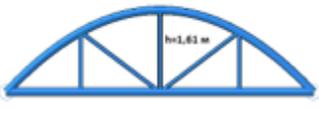


Рис.5.5 Скінченоелемента схема (на прикладі моделі №1,  $h=2,41$  м): аксонометрична модель-а; вид в площині XOY -б; вид в площині XOZ -в; вид в площині YOZ -г;

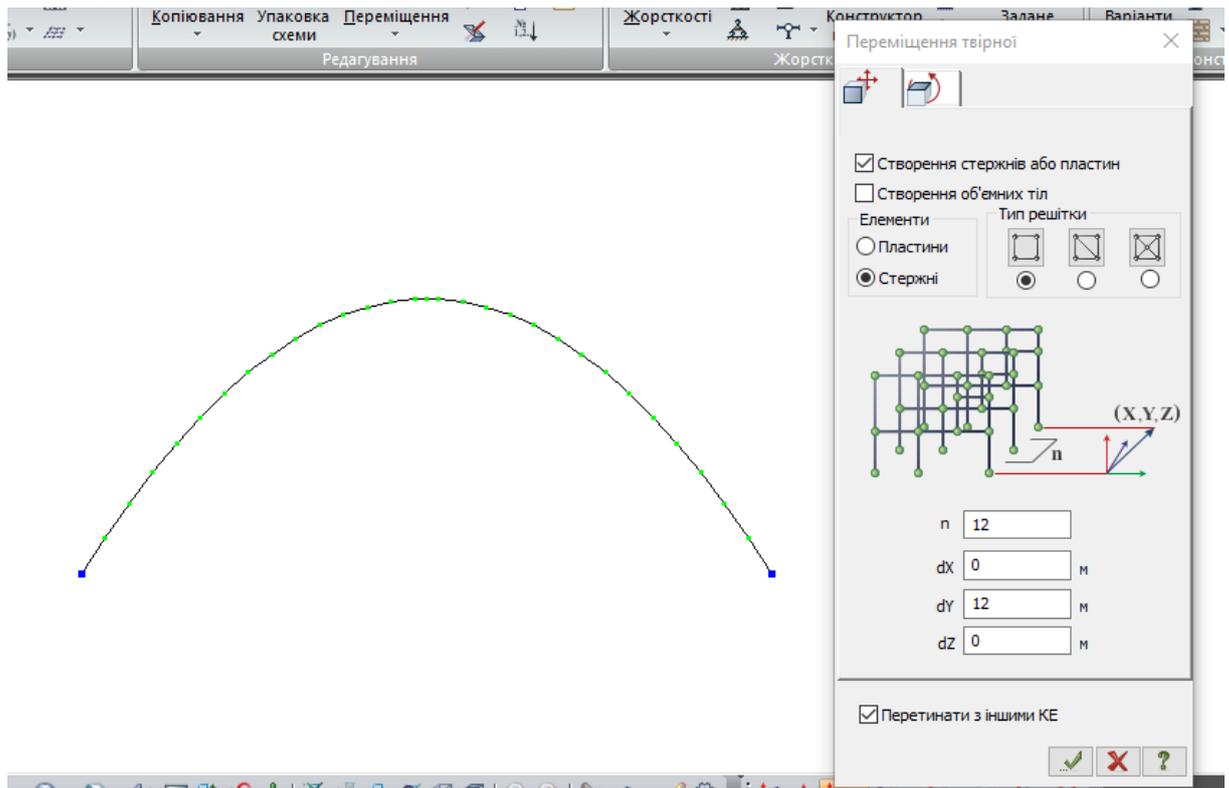
В табл. 5.1 приведено геометричні параметри для СЕ моделей, що планується дослідити.

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	6,0x12,0	2,41	$z = -2 \frac{x^2}{4,5^2}$	
2		2,01	$z = -2 \frac{x^2}{3,75^2}$	
3		1,61	$z = -2 \frac{x^2}{2,8^2}$	

### 5.2.1 Побудова геометрії оболонки способом трансляції твірної

Ознака схеми при моделюванні розрахункових схем прийнята як ознака «5» – система загального виду. Скінченоелементна розрахункова схема сітчастої циліндричної оболонки змодельована за допомогою стержньових скінчених елементів. Для моделювання прийнято CEN<sup>10</sup> типу «універсальний стержень». Використовуючи опцію «генерація твірної» в площині XOZ для створення твірних циліндричних оболонок за формулами, наведеними в табл.5.1 було створено три параболічних кривих, що мали різну висоту (табл.5.1). Далі способом перенесення (трансляції) плоскої твірної вздовж двох направляючих (прямих ліній), що паралельні осі У перенесемо ці плоскі криві 12 разів з кроком 1,0 м. Таким чином утвориться стержньова поверхня циліндричної форми з кроком твірних-стержнів 1,0 м.



**Рис. 5.6** Генерація способом перенесення поверхні стержньової  
циліндричної оболонки (на прикладі моделі №1)

Скінченими елементами №10 змодельовано також і елементи торцевої діафрагми жорсткості й бортові елементи жорсткості (див рис.5.4).

### **5.3 Параметри жорсткості**

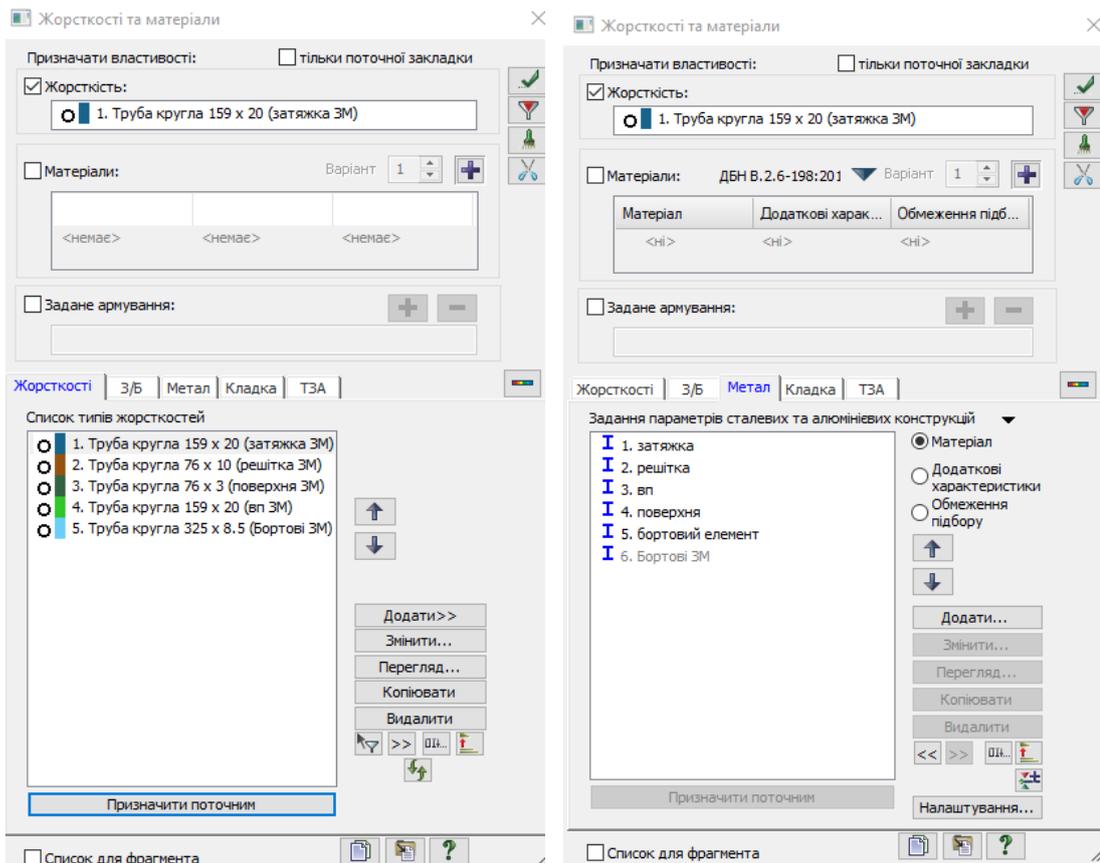
Для першого статичного розрахунку задаємося параметрами жорсткостей для усіх груп конструктивних елементів та параметрами конструювання (вказемо дані по матеріалах) для подальшого конструктивного розрахунку.

Як раціональну форму перерізу для усіх конструктивних груп стержнів прийнято профіль у вигляді гарячекатаної безшовної труби за [2].

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

Назва елемента	Поперечний переріз, см	$E, \text{т/м}^2$	$R, \text{т/м}^3$	$\mu$	Сталь С235	$q, \text{т/м}$
1.Стержні верхнього поясу діафрагми жорсткості	Труба ТБ 154×20 (ДСТУ 8732-78)	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	Ст4 пс	0.068531
2.Стержні нижнього поясу діафрагми жорсткості	Труба ТБ 154×20 (ДСТУ 8732-78)				Ст4 пс	0.068531
3.Елементи решітки діафрагми жорсткості	Труба ТБ 76 × 10 (ДСТУ 8732-78)				Вст2пс	0.01627
4. Стержні криволінійної поверхні	Труба ТБ 76 × 3 (ДСТУ 8732-78)				Ст4пс	0.00539867
5. Бортові елементи	Труба ТБ 328 × 8,5 (ДСТУ 8732-78)				Ст4пс	0.0663185

На рис.5.7 наведено діалогові вікна, в яких призначаються параметри жорсткості стержнів (профіль труби) для виконання статичного розрахунку та параметри матеріалу сталі (параметри матеріалу, додаткові характеристики та обмеження підбору).



а) б)

Рис.5.7 Призначення параметрів жорсткостей –а; та параметрів матеріалу –б

При визначенні матеріалів для конструктивних груп стержнів, що були попередньо обрані, для стержнів верхнього та нижнього поясів застосовували тип «елемент поясу ферми», а для елементів решітки використовували тип «елемент решітки ферми». Розрахунок сталевих конструкцій здійснювався в межах їхньої пружної роботи

#### 5.4 Граничні умови та навантаження

Прийємо жорстке закріплення циліндричних моделей оболонок жорстко, в 4-х точках (кутах) спірання на колони.

Основними навантаженнями, що діють на оболонку, прийнято власну вагу самої стержньової конструкції, вагу покрівельної системи та снігове навантаження. Дослідження [5] показують, що вплив вітрових навантажень

можна вважати незначним, оскільки зусилля від вітру становлять приблизно 1–1,5%. Відповідно, їхній вплив на напружено-деформований стан оболонки не є суттєвим.

Будівля споруджується в місті Суми, характеристичне значення снігового навантаження відповідно до норм [3] становить 0,167 т/м<sup>2</sup>. У розрахунках передбачено три варіанти 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 1м<sup>2</sup> покриття

Назва	Характеристичне значення навантаження, (кН/м <sup>2</sup> )	Коеф. надійності за навантаженням $\gamma_f$	Розрахункове навантаження кН/м <sup>2</sup>
<b>I. Постійні навантаження</b>			
Власна вага конструкції (згідно призначених жорсткостей)	Автоматично визначається в ПК «Ліра-САПР»		
Склопакет однокамерний (світлопрозоре закління)Гп	0,192	1.05	0,2016
<b>ВСЬОГО ПОСТІЙНЕ:</b>	0,192		0,2016
<b>II. Тимчасове навантаження</b>			
Снігове навантаження (за ДБН В.1.2-2:2006, додаток Е) для м. Суми (1670 Па=1,67 кН/м <sup>2</sup> )	1,67	1.14	1,90
<b>Повне навантаження (без врахування власної ваги)</b>	1,862		2,10

Прийнято три завантаження на верхній пояс циліндричної оболонки (див. табл. 4.3 та рис.5.8–5.10).

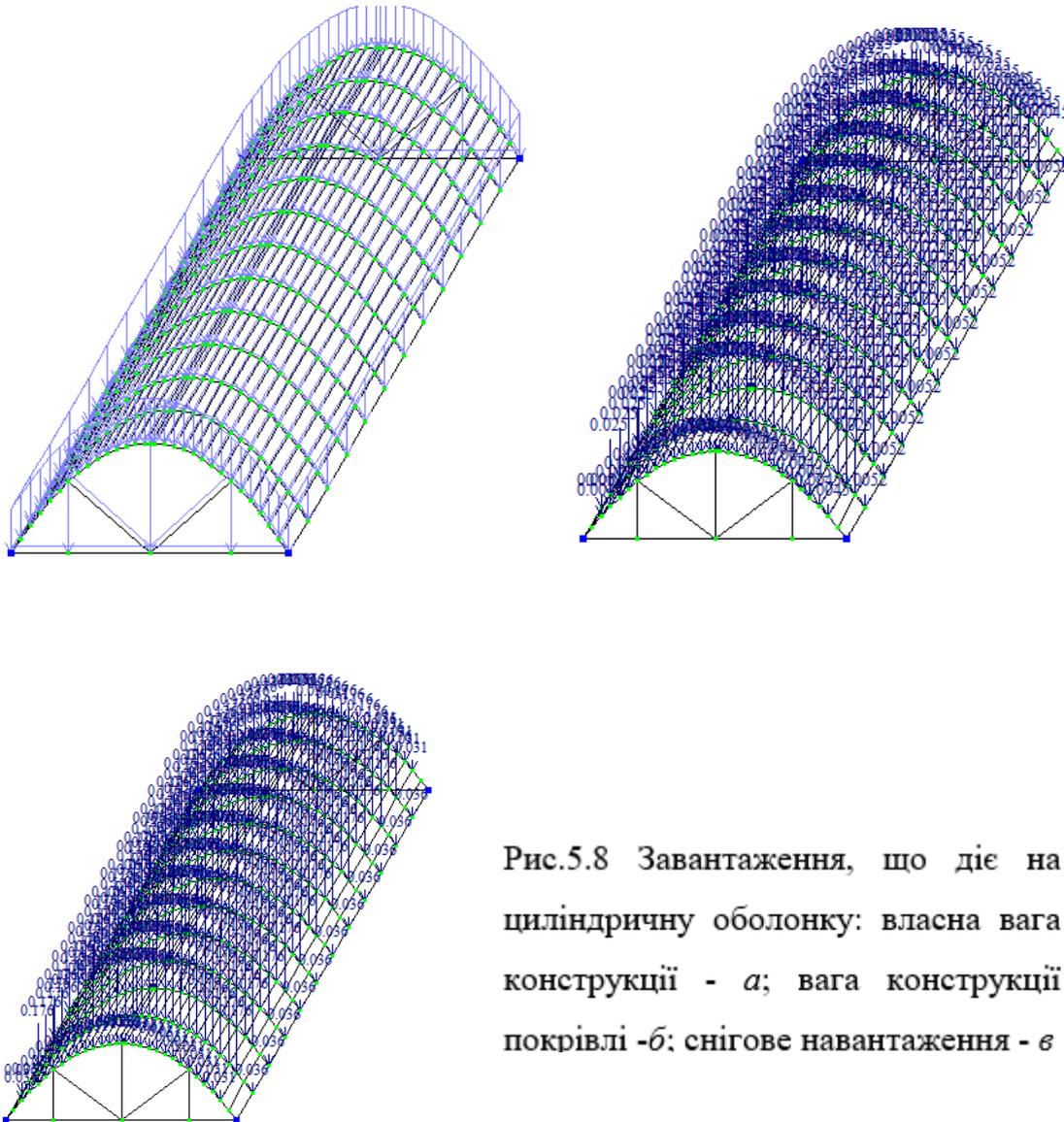


Рис.5.8 Завантаження, що діє на циліндричну оболонку: власна вага конструкції - *a*; вага конструкції покрівлі - *б*; снігове навантаження - *в*

## РОЗДІЛ 6

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ

Визначення найбільш ефективної СЕ моделі з точки зору статичної роботи полягає в оцінці характеру та максимальних величин параметрів напружено-деформованого стану конструкції – величин зусиль (напружень), деформацій, параметрів стійкості. В модулі ЛІР-ВІЗОР ПК Ліра-САПР можливо оцінити й в подальшому проаналізувати ці параметри.

Аналіз виконується від найбільш небезпечного сполучення розрахункових навантажень – РСН2.

### 6.1 Деформативність розрахункових моделей

При однакових параметрах жорсткості перерізів стержньових елементів (табл. 5.2) для всіх СЕ моделей було проведено статичний розрахунок згідно з методикою розрахункового сполучення навантажень (РСН). На рис. 6.1 представлено мозаїки вертикальних переміщень вузлів оболонкових полів під дією найменш сприятливої комбінації навантажень.

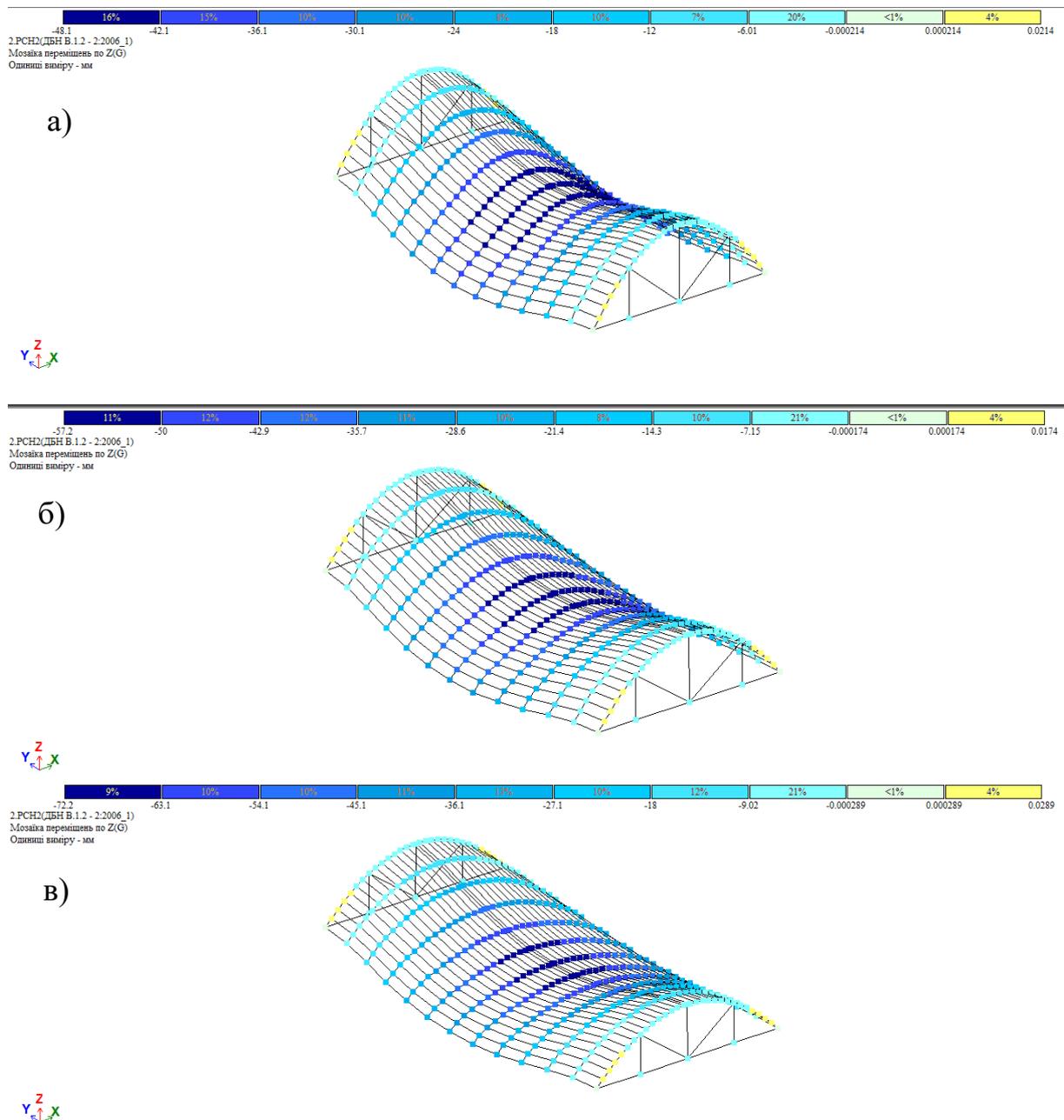


Рис. 6.1 Деформована схема та мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема: для схеми №1 ( $f_{z, \max} = 48,1$  мм -а; для схеми №2 ( $f_{z, \max} = 57,2$  мм )-б; для схеми №3 ( $f_{z, \max} = 72,2$  мм )-в

В таблиці 6.1 приведено результати щодо деформаційного розрахунку для вузлів поля оболонок згідно моделей, що розглядаються.

Таблиця 6.1. Максимальні переміщення  $f_z$  вузлів скінченоеlementної схеми від РСН2

№ сполучення	Схема №1	Схема №2	Схема №3
РСН 1	-7,59	-10,4	-12,8
РСН2	<b>-48,1</b>	<b>-57,2</b>	<b>-72,2</b>
РСН3	-44,1	-54,9	-66,3

На рис. 6.2 графічно відображено дані, що приведено в табл.6.1

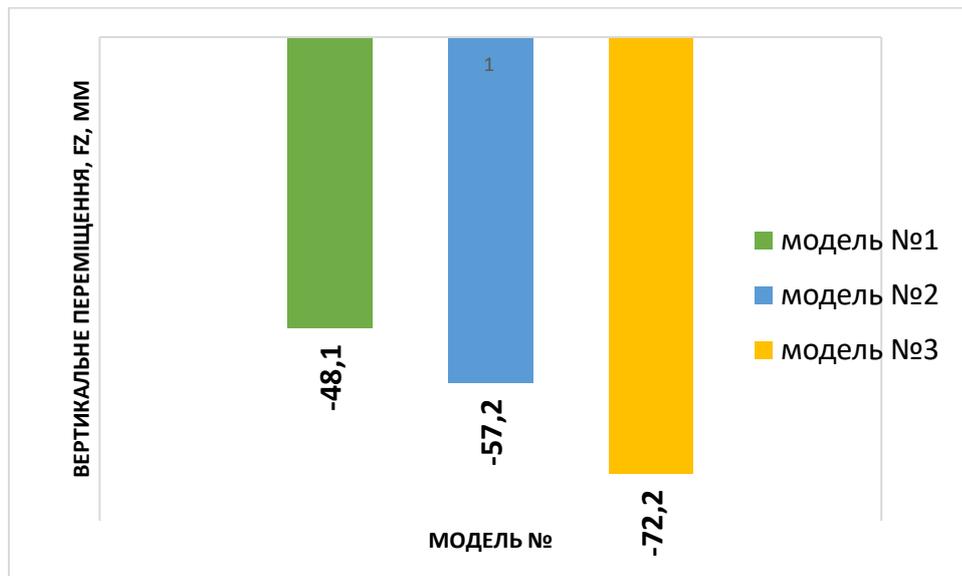


Рис. 6.2 Максимальні переміщення вузлів  $f_z$  в скінченоеlementних моделях циліндричної оболонки від РСН2

З рис. 6.2 та табл. 6.1 видно, що модель №1 циліндричної оболонки (з найбільшою стрілою підйому) характеризується найменшим вертикальним прогином, тобто має найменшу деформативність й найбільшу жорсткість. А модель з найменшою стрілою підйому має найбільшу

деформативність й найбільший вертикальний прогин. Значення максимальних прогинів для всіх моделей не перевищують значення гранично допустимого прогину згідно норм [4] :

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

На рис. 6.3 наведено графіки вертикальних переміщень вузлів розрахункових скінченоелементних моделей циліндричних оболонок в середині прольоту конструкції. Значення переміщень прийнято від найбільш несприятливого сполучення навантажень – РСН 2.

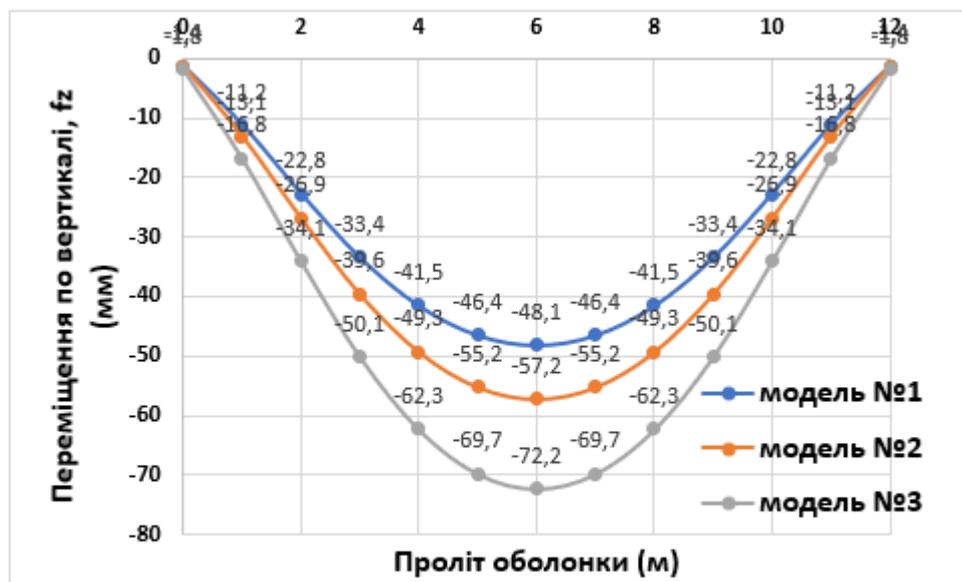
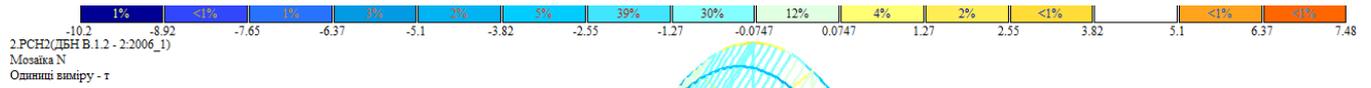


Рис. 6.3 Графіки прогинів вздовж прольоту (l=12 м) для сітчастих циліндричних оболонок

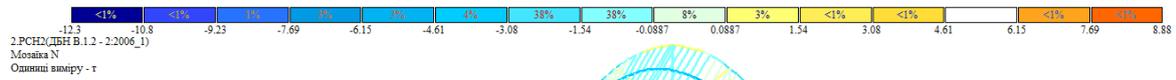
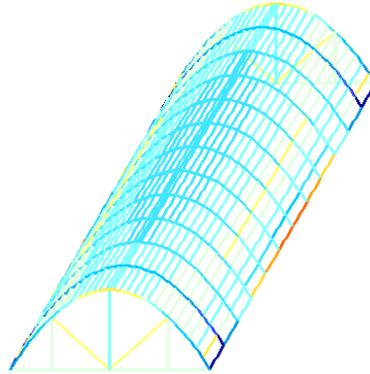
Так, із рис. 6.3 видно, що характер деформацій вздовж прольоту оболонки в середній її частині є однаковим для всіх моделей. Це обумовлено тим, що параметри жорсткості, кількість скінчених елементів та вузлів, завантаження є однаковими для всіх трьох моделей. Параметри деформування відрізняються лише абсолютним значенням максимальним прогинів в середньому перерізі стержньових оболонок. Так, очевидно, що найбільш жорсткістю буде модель №1 з найбільшою стрілою підйому (висотою) оболонки, що дозволяється. Тобто, очевидно, що із зменшенням висоти циліндричної оболонки її деформативність зростає.

## 6.2 Напружений стан моделей, що досліджуються

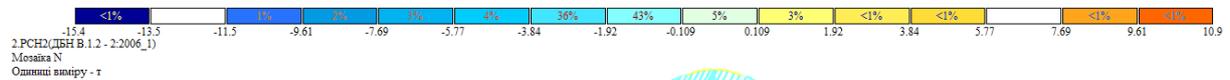
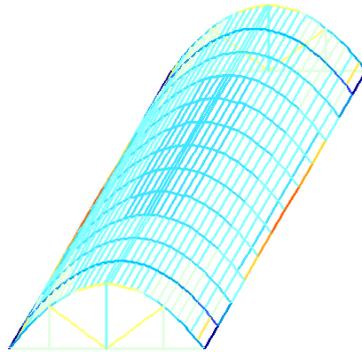
На рис. 6.4 представлено мозаїку осьових сил  $N$  у стержнях конструкцій від РСН2. Елементи верхнього поясу структурної плити зазнають стиску, нижнього – розтягу, а стержні решітки характеризуються знакозмінними зусиллями.



а)



б)



в)

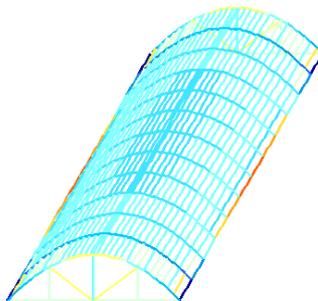


Рис. 6.4 Мозаїка зусиль N у стержнях від РСН2: для моделі №1-а; для моделі №2-б; для моделі №3-в

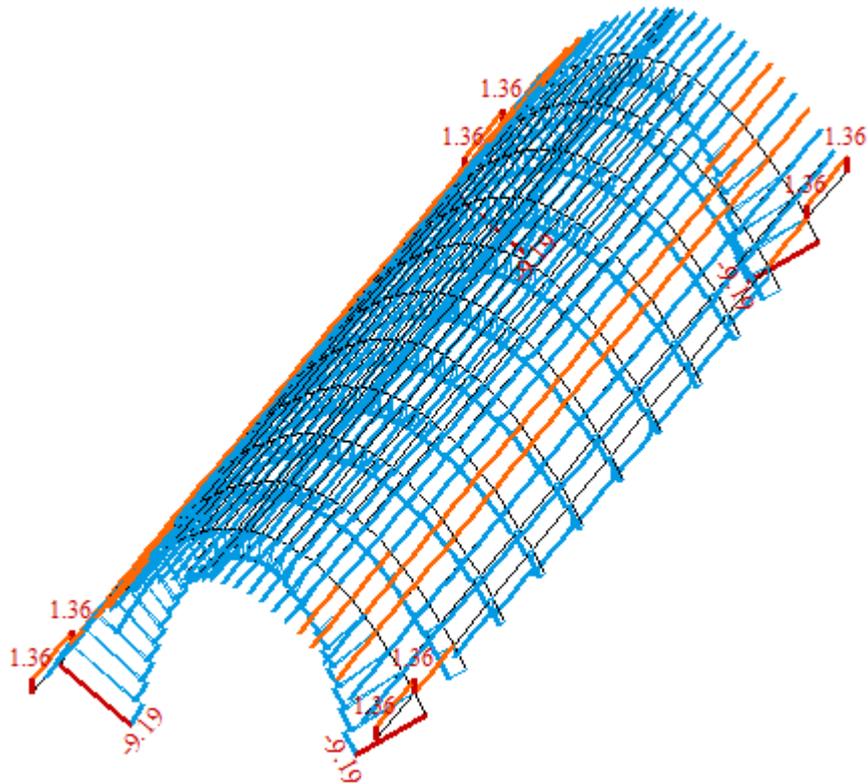
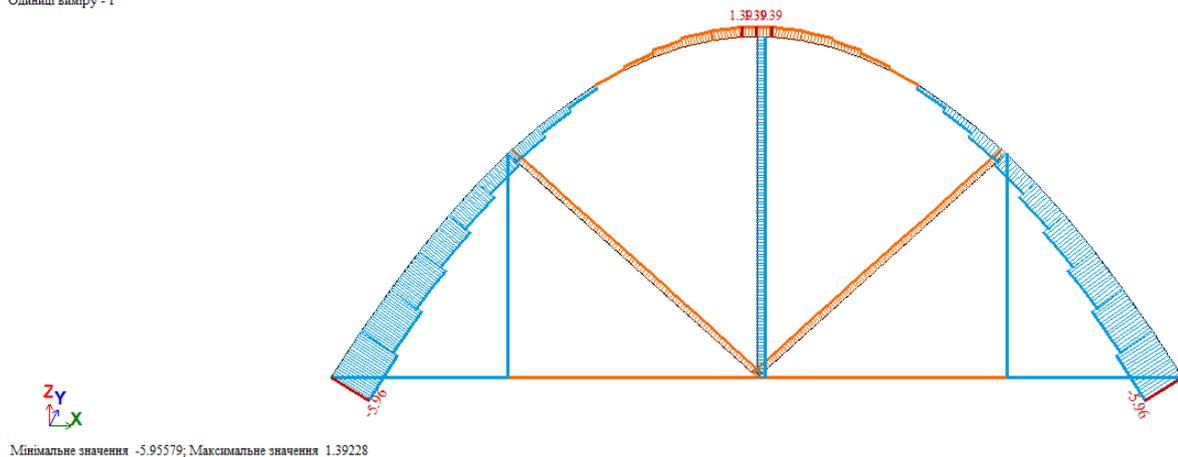


Рис. 6.5 Епюра зусилля N в стержнях оболонки, що формують її поверхню від РСН2 на прикладі СЕ моделі №1

2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епюра N  
Одиниці виміру - т



Мінімальне значення -5.95579; Максимальне значення 1.39228

Рис. 6.6 Епюра зусилля N в елементах торцевої діафрагми жорсткості від РСН2 на прикладі СЕ моделі №1

2.PCH2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епюра N  
Одиниці виміру - т

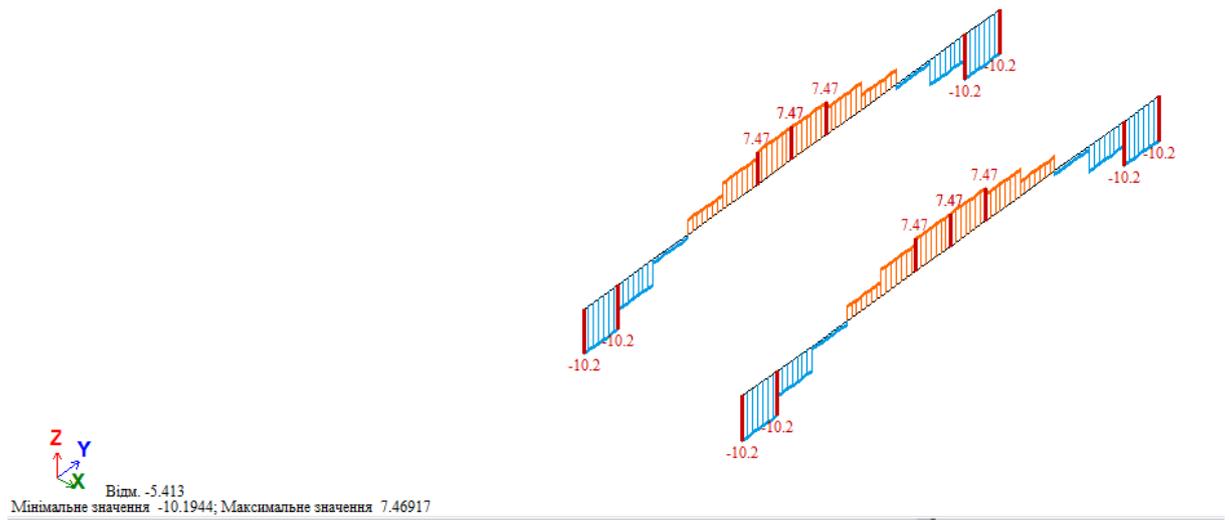


Рис. 6.7 Епюра зусилля N в бортових елементах від PCH2 на прикладі СЕ моделі №1

2.PCH2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епюра Mu  
Одиниці виміру - т\*м

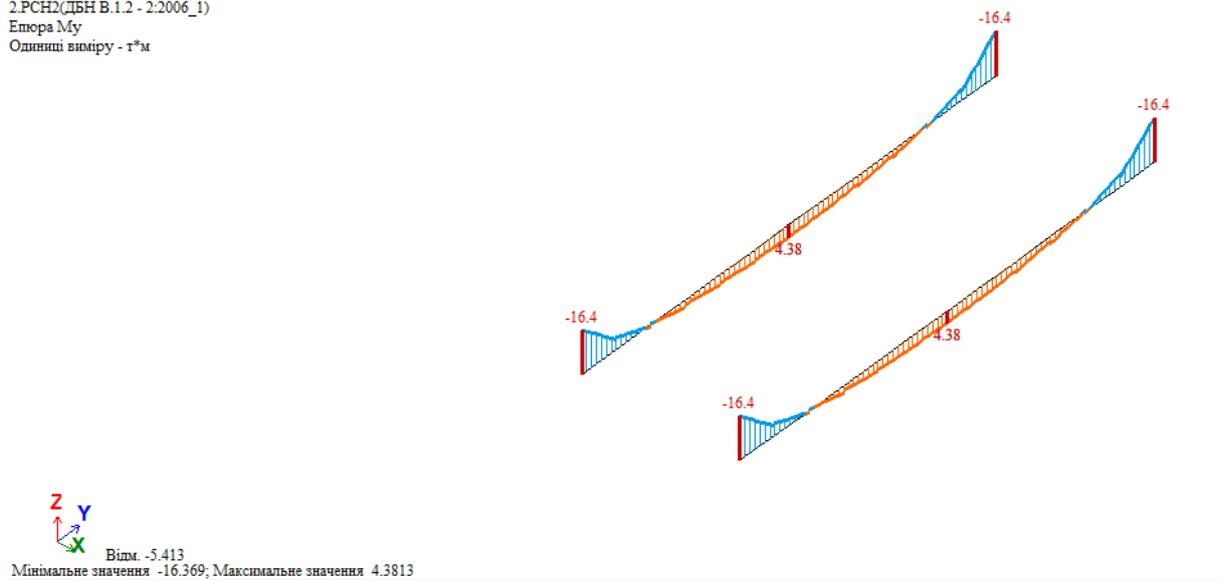
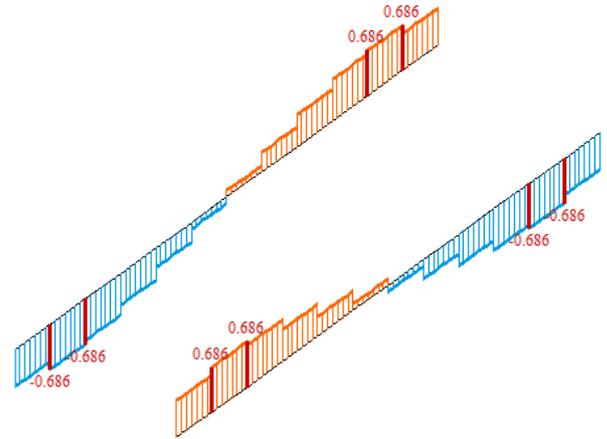


Рис. 6.8 Епюра зусилля Mu в бортових елементах від PCH2 на прикладі СЕ моделі №1

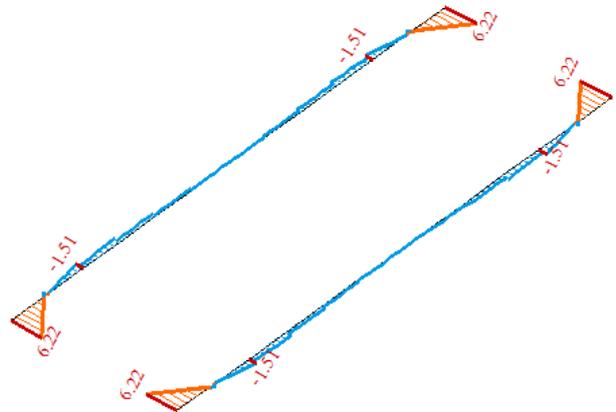
2.PCH2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епюра  $M_x$   
Одиниці виміру - т\*м



  
Вісм. -5.413  
Мінімальне значення -0.68621; Максимальне значення 0.68621

Рис. 6.9 Епюра зусилля  $M_x$  в бортових елементах від РСН2 на прикладі СЕ моделі №1

2.PCH2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епюра  $M_z$   
Одиниці виміру - т\*м



  
Вісм. -5.413  
Мінімальне значення -1.51106; Максимальне значення 6.22402

Рис. 6.10 Епюра зусилля  $M_z$  в бортових елементах від РСН2 на прикладі СЕ моделі №1

В таблицях 6.2-6.7 приведено максимальні величин зусиль для СЕ моделей, що досліджуються від РСН2 для усіх конструктивних груп стержнів.

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

№ РСН	Схема№1		Схема№2		Схема№3	
РСН 1	-1,01	0,159	-1,25	0,202	-1,33	0,183
РСН 2	<b>-5,96</b>	<b>1,39</b>	<b>-6,34</b>	<b>1,43</b>	<b>-6,92</b>	<b>1,43</b>
РСН 3	-5,47	1,27	-6,09	1,37	-6,36	1,31

Таблиця 6.3. Максимальні зусилля N (т) в стержнях **решітки** торцевої діафрагми жорсткості

№ РСН	Схема№1		Схема№2		Схема№3	
РСН 1	-0,138	0,144	-0,161	0,178	-0,161	0,175
РСН 2	<b>-1,1</b>	<b>0,839</b>	<b>-1,08</b>	<b>0,976</b>	<b>-1,05</b>	<b>0,965</b>
РСН 3	-1	0,818	-1,03	0,936	-0,963	0,886

Таблиця 6.4. Максимальні зусилля N (т) в **елементах затяжки** торцевої діафрагми жорсткості

№ РСН	Схема№1		Схема№2		Схема№3	
РСН 1	-0,00674	0,00476	-0,0103	0,00725	-0,0126	0,0118
РСН 2	<b>-0,0396</b>	<b>0,0279</b>	<b>-0,0529</b>	<b>0,0373</b>	<b>-0,0674</b>	<b>-0,0629</b>
РСН 3	-0,0363	0,0256	-0,0508	0,0358	-0,0619	0,0578

Таблиця 6.5. Максимальні зусилля N (т) в стержнях поля оболонки

№ РСН	Схема№1		Схема№2		Схема№3	
РСН 1	-1,44	0,217	-1,83	0,334	-1,97	0,421
РСН 2	<b>-9,19</b>	<b>1,37</b>	<b>-9,79</b>	<b>1,75</b>	<b>-10,9</b>	<b>2,29</b>
РСН 3	-8,42	1,25	-9,39	1,68	-10	2,1

Таблиця 6.6. Максимальні зусилля N (т) в ребрах жорсткості оболонки

№ РСН	Схема№1		Схема№2		Схема№3	
РСН 1	-1,62	1,2	-2,35	1,71	-2,82	2,01
РСН 2	<b>-10,2</b>	<b>7,47</b>	<b>-12,3</b>	<b>8,87</b>	<b>-15,4</b>	<b>10,9</b>
РСН 3	-9,34	6,84	-11,8	8,51	-14,1	10

Таблиця 6.7. Максимальні зусилля  $M_u$  (т·м) в ребрах жорсткості оболонки

№ РСН	Схема№1		Схема№2		Схема№3	
РСН 1	-2,8	0,791	-3,41	1,01	-3,32	1,02
РСН 2	<b>-16,4</b>	<b>4,39</b>	<b>-15,8</b>	<b>4,28</b>	<b>-16,2</b>	<b>4,68</b>
РСН 3	-15	4,03	-15,2	4,12	-14,9	4,32

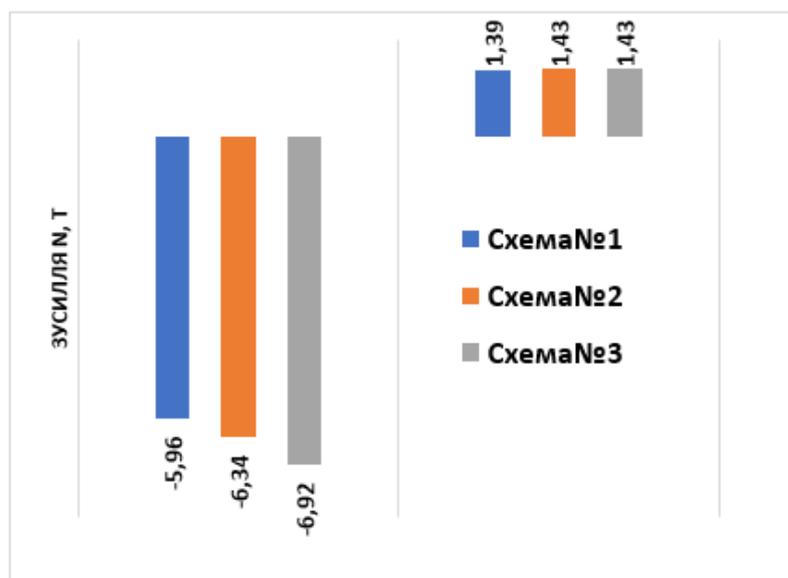


Рис.6.11 Графік максимальних зусиль в стержнях **верхнього поясу** торцевої діафрагми жорсткості

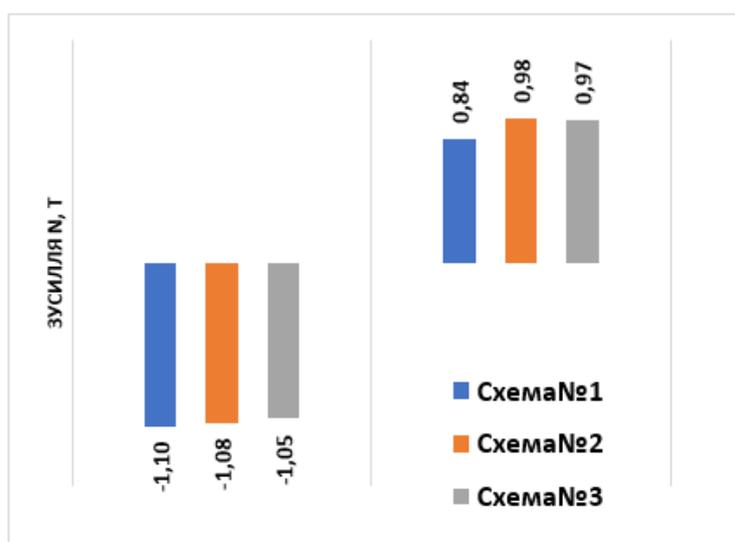


Рис.6.12 Графік максимальних зусиль в стержнях **решітки** торцевої діафрагми жорсткості

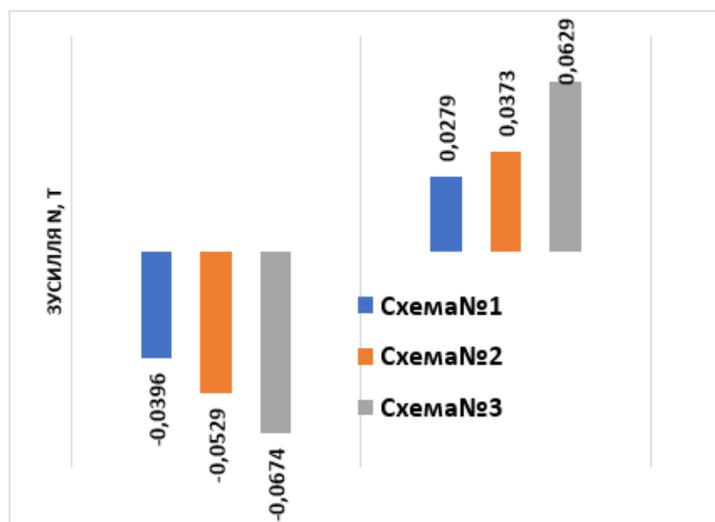


Рис. 6.13 Графік максимальних зусиль N (т) в елементах затяжки торцевої діафрагми жорсткості

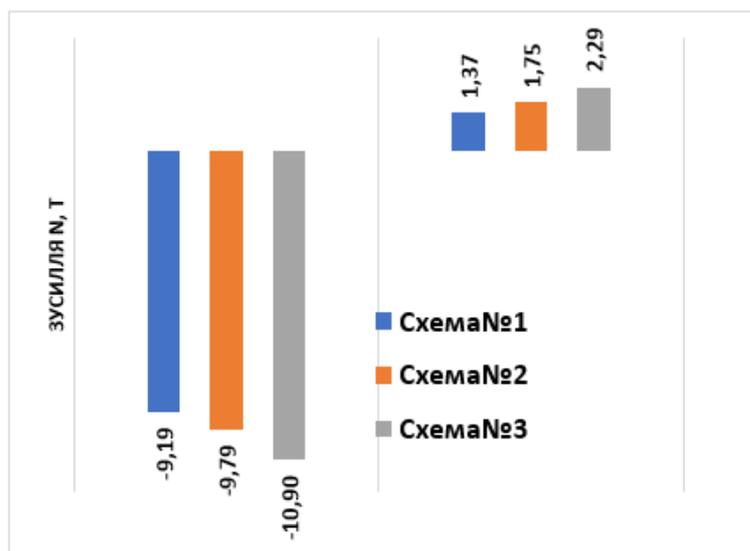


Рис. 6.14 Графік максимальних зусиль N (т) в стержнях поля оболонки

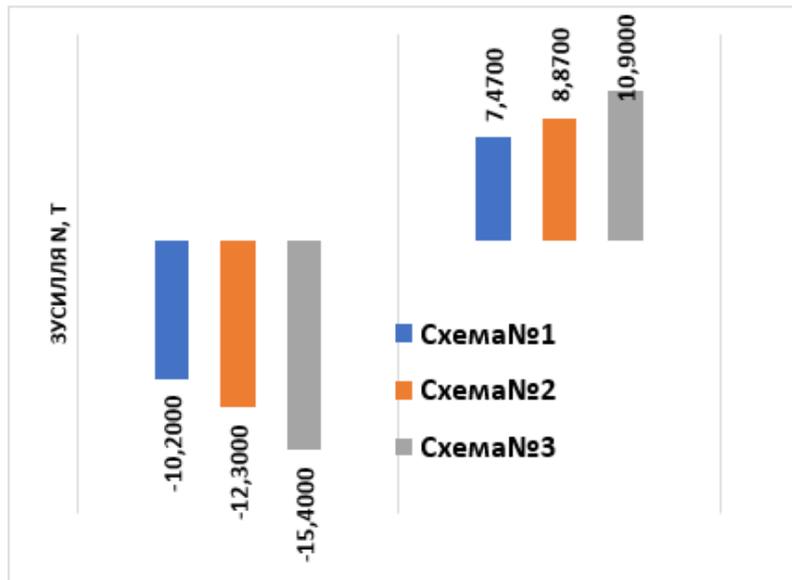


Рис.6.15 Графік максимальних зусиль N (T) в бортових елементах оболонки

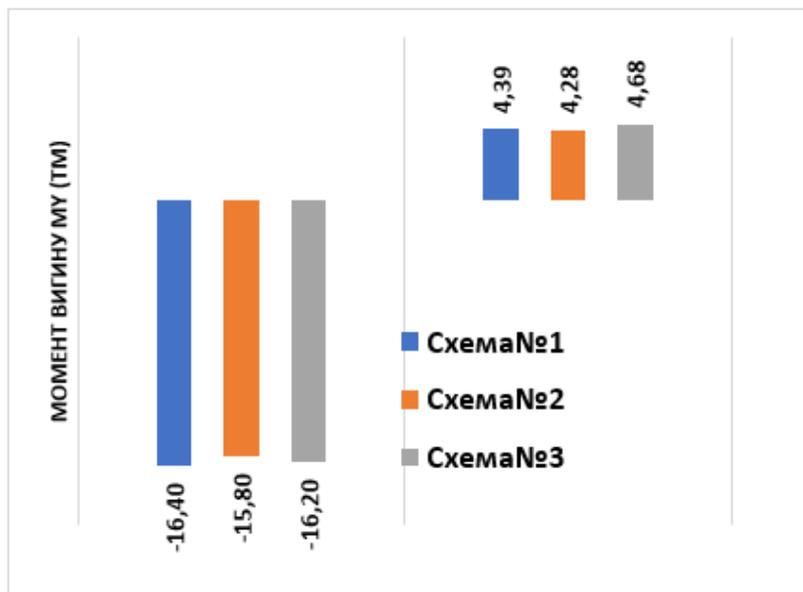


Рис.6.16 Графік максимальних моментів вигину Mu (Tm) в бортових елементах оболонки

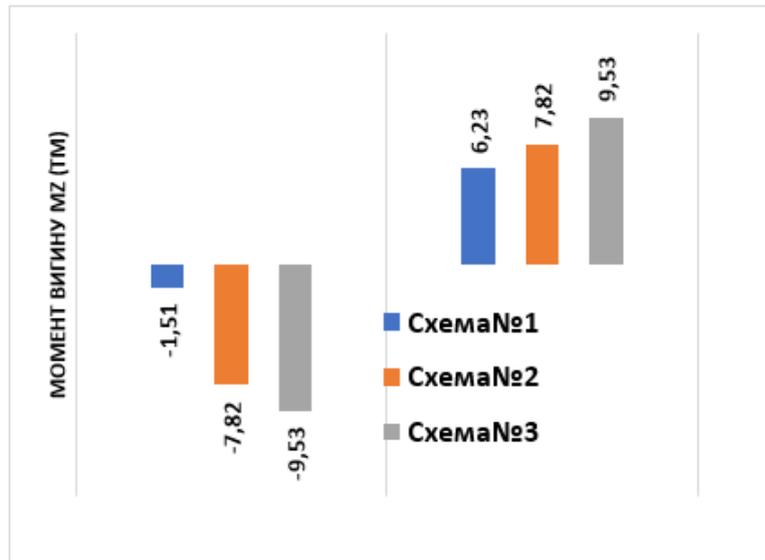
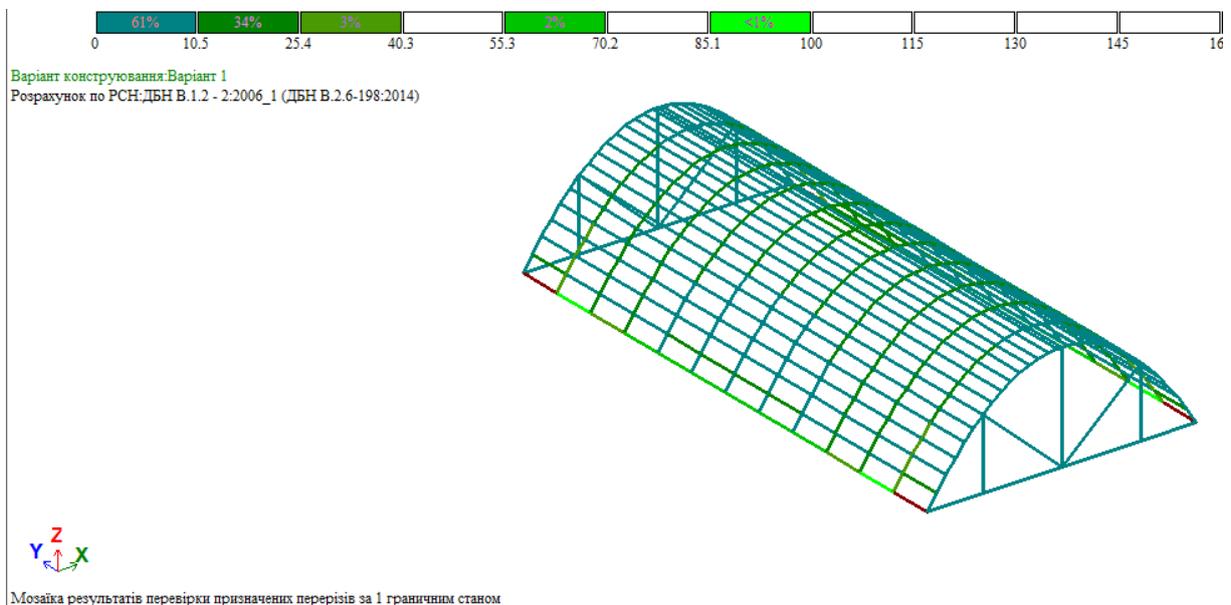
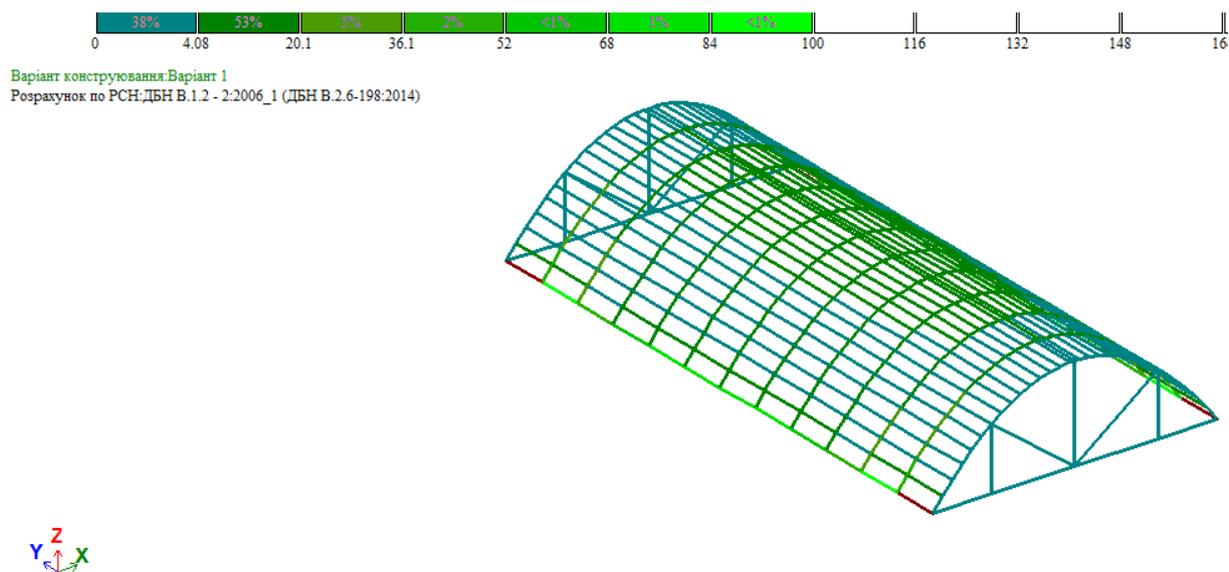


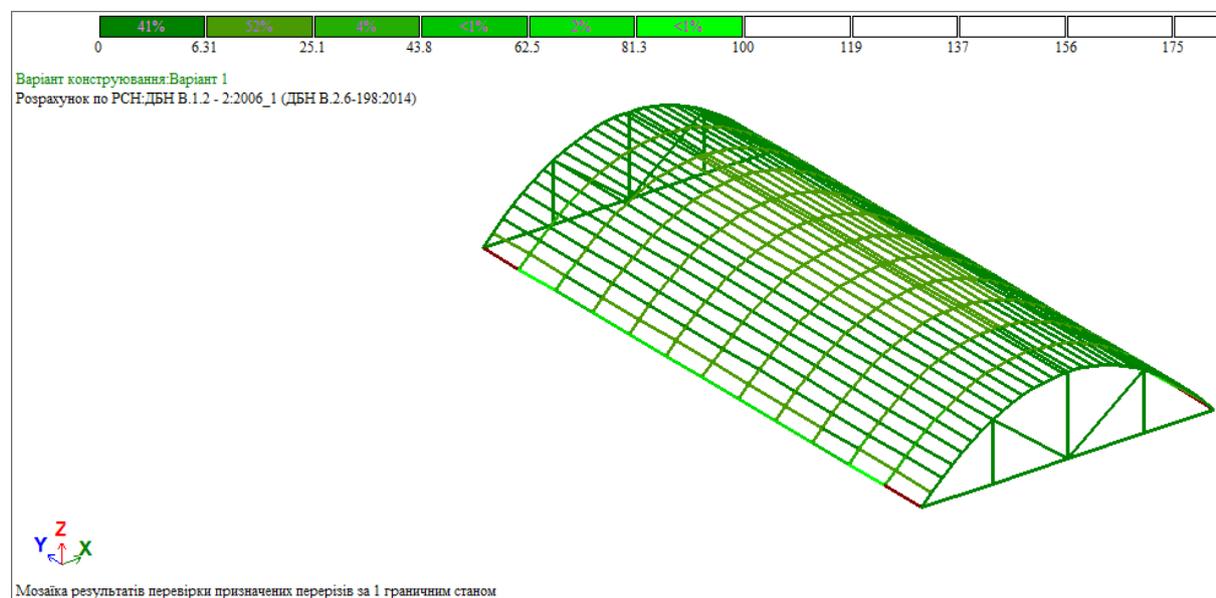
Рис.6.17 Графік максимальних моментів вигину  $M_z$  (тм) в бортових елементах оболонки

На рис. 6.18 наведено мозаїки, що відтворюють ступінь використання (у відсотках) несучої здатності трубчатого перетину елементів. Ступінь використання перерізу обчислена після статичного розрахунку з первинно прийнятими (початковими) жорсткостями елементів конструкцій.





Мозаїка результатів перевірки призначених перерізів за 1 граничним станом



Мозаїка результатів перевірки призначених перерізів за 1 граничним станом

Рис. 6.18 Мозаїка результатів при розрахунку за ІГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності для схеми №1 -а; для схеми №2-б; для схеми №3-в

Найбільший відсоток використання перерізу після статичного розрахунку із початковими показниками жорсткості згідно вимог розрахунку на міцність за [1] наведено в табл.6.9.

Таблиця 6.9 – Максимальне використання, ( %) перерізу після 1-ї ітерації, що призначені у вихідних даних

Назва конструктивної групи стержнів	І ГС		
	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Верхній пояс торцевої діафрагми жорсткості	2,4	2,5	2,8
Решітка торцевої діафрагми жорсткості	1,9	1,7	1,8
Поле оболонки	37	39,1	42,8
Бортові елементи	86,3	89,4	98,1

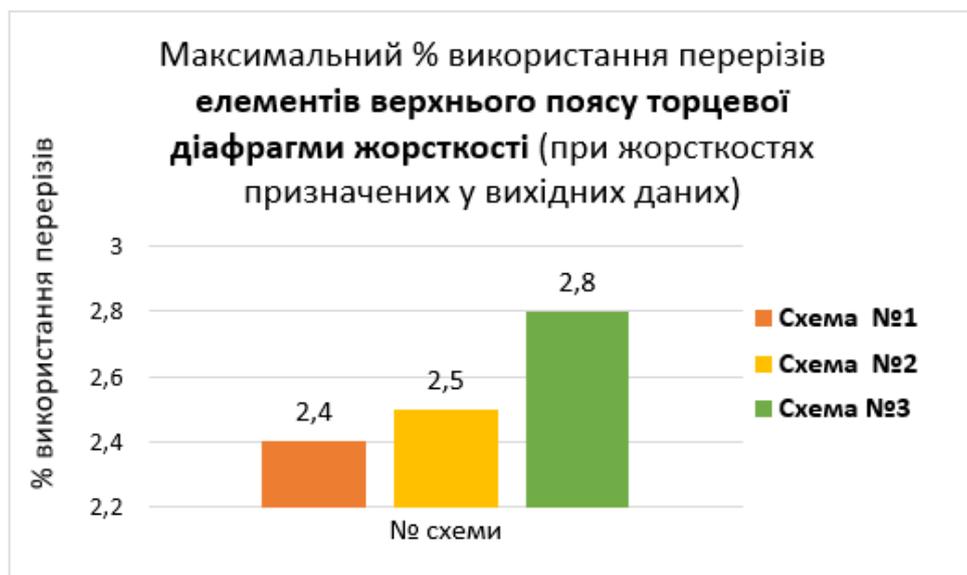


Рис. 6.19 Діаграми максимального % використання перерізів елементів верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості (при жорсткостях призначених у вихідних даних)



Рис. 6.20 Діаграми максимального % використання перерізів решітки торцевої діафрагми жорсткості (при жорсткостях призначених у вихідних даних)



Рис. 6.21 Діаграми максимального % використання перерізів елементів поля оболонки (при жорсткостях призначених у вихідних даних)

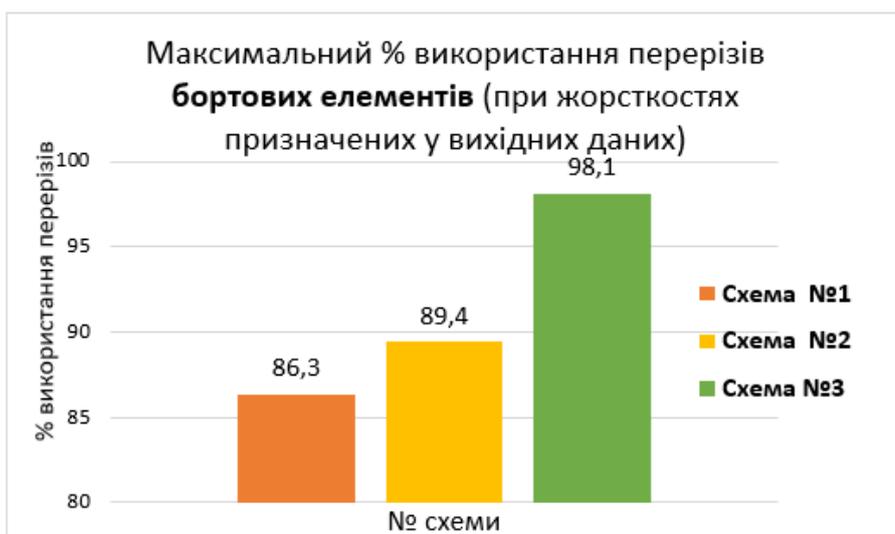


Рис. 6.22 Діаграми максимального % використання перерізів елементів поля оболонки (при жорсткостях призначених у вихідних даних)

Так, очевидно із табл. 6.9 та рис. 6.19–6.22, що найбільш недонапруженими є елементи усіх конструктивних груп для моделі №1, де і зусилля всіх видів будуть найменшими в порівнянні із величинами зусиль, що виникають у відповідних елементах в моделях №2 та №3. У всіх моделях несуча здатність перерізів стержнів решітки торцевої діафрагми жорсткості та елементів верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості майже не використовується.

Несуча здатність перерізів стержнів цих конструктивних груп використовується всього на 1,7-2,8%, тобто недонапруження становить 97%. Це значить, що для стержнів решітки та верхнього поясу треба прийняти стержні значно меншого перерізу.

У всіх моделях несуча здатність стержнів поля оболонки знаходиться в межах 37-42,8%, що свідчить про те, що ця група конструктивних стержнів теж є недонапруженою більше ніж на майже 60%.

### 6.3 Аналіз стійкості моделей, що досліджуються

Коефіцієнт стійкості є показником, що відображає рівень стійкості системи до зовнішніх збурень або змін умов. Він може мати як додатне, так і від'ємне значення. Якщо коефіцієнт має знак «-», система вважається нестійкою, що вимагає проведення статичного аналізу та внесення змін у конструктивні рішення.

Ціла частина коефіцієнта стійкості вказує, у скільки разів можна ще підвищити рівень навантаження на систему, перш ніж вона втратить стійкість.

На рисунках 6.23–6.15 зображено форми втрати стійкості для всіх трьох СЕ моделей, а в таблиці 6.11 наведено відповідні коефіцієнти стійкості.

2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Форма втрати стійкості у гл. с. 1  
Коефіцієнт 10.1788

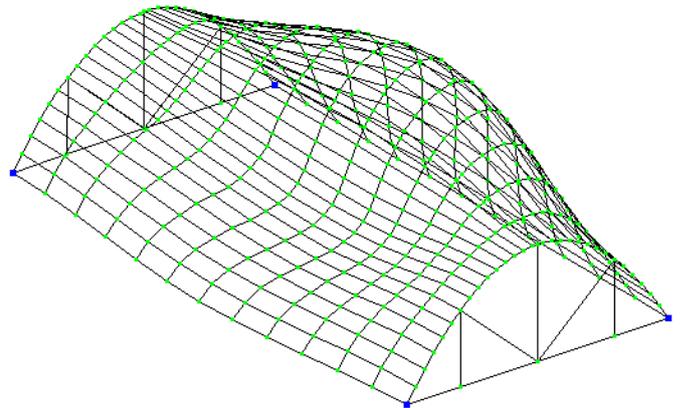


Рис.6.23 Форма втрати стійкості для моделі №1 (k=10,18)

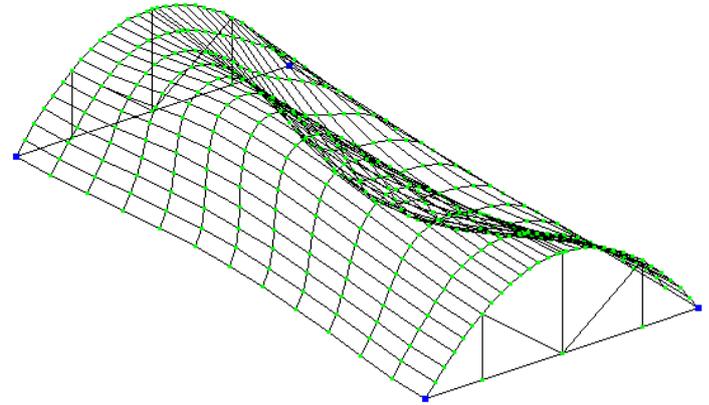


Рис.6.24 Форма втрати стійкості для моделі №2 ( $k=8,72$ )

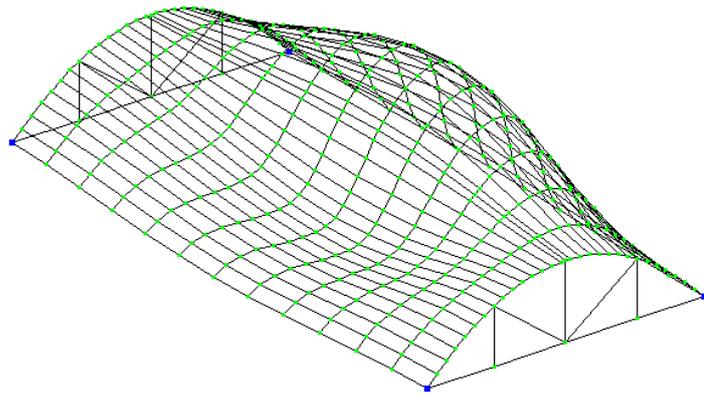


Рис.6.25 Форма втрати стійкості для моделі №3 ( $k=7,53$ )

Таблиця. 6.10 Коефіцієнти стійкості для моделей циліндричної оболонки, що досліджується

k	Схема №1	Схема №2	Схема №3
	10,18	8,72	7,53

На рис. 6.16 відображено значення параметрів стійкості для моделей.

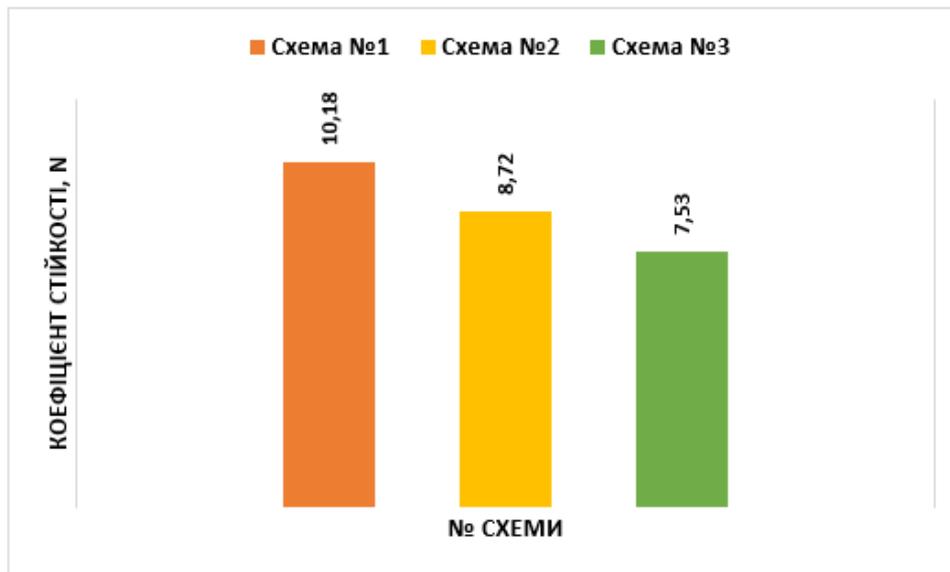


Рис.6.16 Коефіцієнт стійкості  $k$  для моделей, що досліджуються

Очевидним є факт, що стійкість оболонки нульової гаусової кривини збільшується прямопропорційно збільшенню її стріли підйому. Тобто, чим більшу висоту має напівциліндрична поверхня, тим вона буде стійкішою, і навпаки, чим більше її поверхня наближається до площини, тим менш стійкою вона стає. У всіх моделях, що досліджуються має місце значний запас стійкості (коефіцієнт  $k$  варіюється від 7,5 до 10). Тобто для втрати конструкцією стійкості її треба завантажити в 7,5–10 разів більшим навантаженням, ніж те, що прикладено за розрахунком.

### 6.3 Визначення нових перерізів стрижнів

У таблицях 6.11–6.15 наведено результати підбору нових трубчастих перерізів для всіх груп конструктивних елементів досліджуваних моделей після першої ітерації статичного розрахунку.

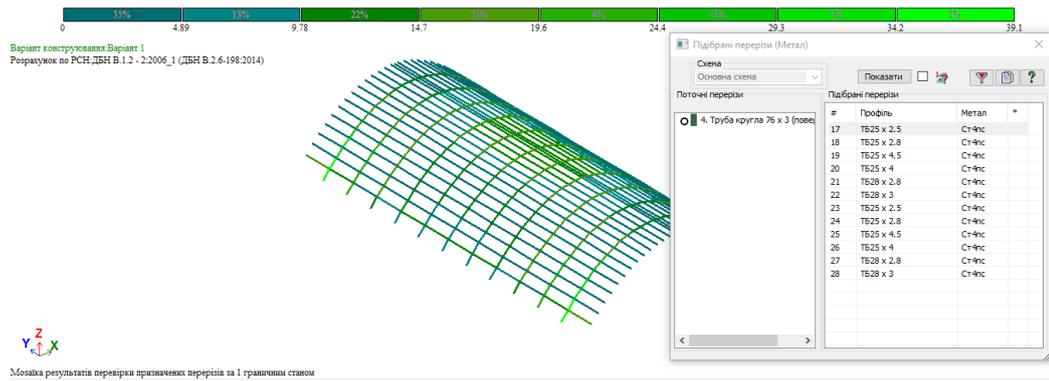


Рис. 6.17 Перерізи, призначені стержням поверхні в моделі «Метал»

ПК Ліра-САПР після 1-го статичного розрахунку для моделі №2

Таблиця 6.11 Підбір елементів **верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості** поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 159x20	Ст4пс	ТБ 28x2,8	0.00173941	16,04	0,0279
2			ТБ 32x2,5	0.00181804	14,97	0,027216
3			ТБ32x2,8	0.0020155	14,00	0,028217

Таблиця 6.12 Підбір елементів **нижнього поясу торцевої діафрагми жорсткості** поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 159x20	Ст4пс	ТБ 25x2,5	0.00138664	12,0	0,01664
2			ТБ 25x2,5	0.00138664	12,0	0,01664
3			ТБ 25x2,5	0.00138664	12,0	0,01664

Таблиця 6.13 Підбір елементів **решітки торцевої діафрагми жорсткості**  
після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 76x10	ВСт3пс	ТБ 25x2,5	0.00138664	20,62	0,028593
2			ТБ 25x2,5	0.00138664	18,09	0,025084
3			ТБ 25x2,5	0.00138664	15,72	0,021798

Таблиця 6.14 Підбір елементів **поля оболонки** після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 76x3	Ст4пс	ТБ 32x2,8	0.0020155	436,21	0,879181
2			ТБ 28x3	0.00184886	430,33	0,79562
3			ТБ 38x2,8	0.00242965	425,05	1,032723

Таблиця 6.15 Підбір **бортових елементів** після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 325x8,5	Ст4пс	ТБ 500x9,5	0.121895	24,0	2,92548
2			ТБ 500x9,5	0.121895	24,0	2,92548
3			ТБ 500x9,5	0.121895	24,0	2,92548

На рис.6.18-6.22 у вигляді діаграм наведено вагу для конструктивних груп елементів циліндричних оболонок.

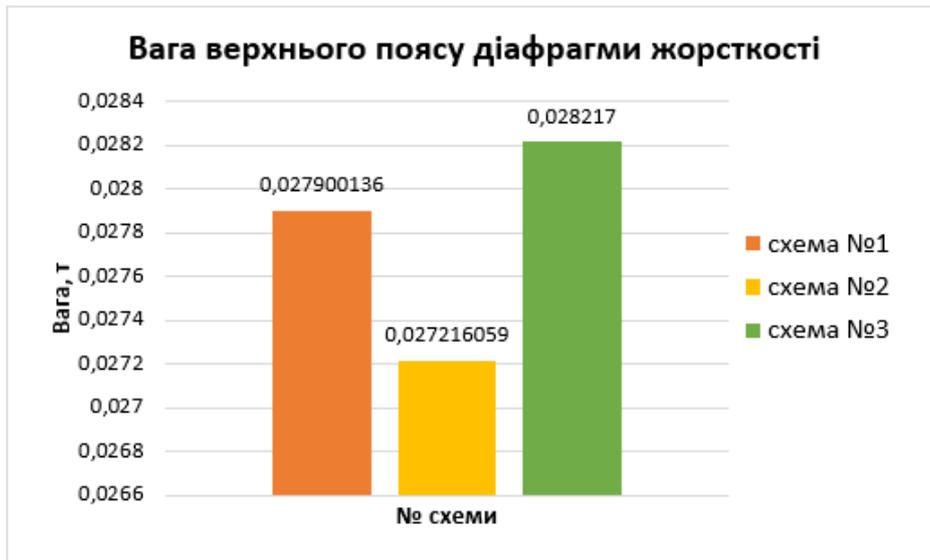


Рис.6.18 Вага верхнього поясу діафрагми жорсткості



Рис. 6.19 Вага нижнього поясу діафрагми жорсткості

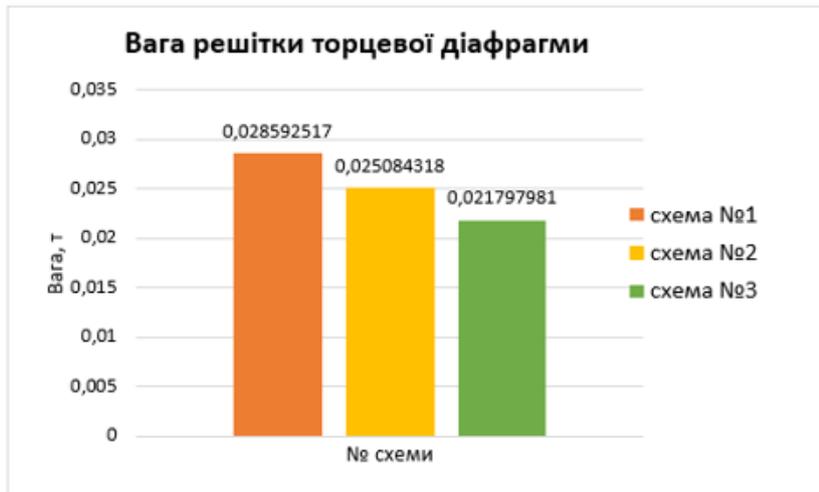


Рис. 6.20 Вага решітки торцевої діафрагми жорсткості



Рис. 6.21 Вага стержнів поля оболонки



Рис. 6.22 Вага бортових елементів жорсткості

Загальна вага моделей, що досліджуються, наведена на рис.6.23.

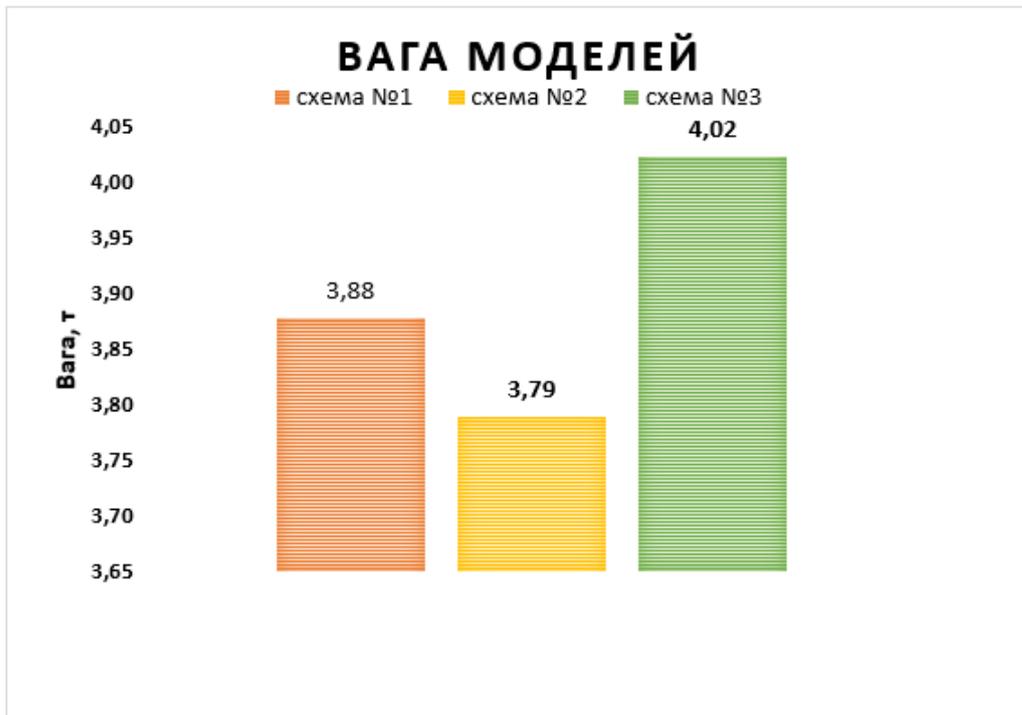


Рис.6.23 Підрахунок загальної ваги моделей сітчастих циліндричних оболонок

Із рис.6.18-6.22 видно, що чим пологіша оболонка, тим більші за модулем зусилля  $N$  виникають в її стержнях. І навпаки – чим більша стріла підйому циліндричної оболонки, тим менше стержні, що утворюють її поверхню, напружені. А, отже, як результат вага поля найпологішої оболонки (модель №3) буде найбільшою, а вага поля оболонки найбільш вшарушеної (модель №1) – буде найменшою (рис. 6.21).

Підрахунок ваги усієї моделі циліндричної оболонки показав, що найбільшу вагу буде мати найбільш полого модель – модель №3. Вага моделей №1 та 2 є майже однаковими. Вага моделі №1 всього в 1,02 рази (на 2%) перевищує вагу моделі №2.

Вага кожної групи конструктивних елементів для моделей підрахована на основі даних підбору перерізів в модулі «Метал» (рис.6.17) після розрахунку з призначеними жорсткостями у вихідних даних. Отже, за

критерієм матеріалоемності (рис. 6.23) з-поміж моделей сітчастої циліндричної оболонки, що досліджувалися, найбільш ефективною (тобто моделлю з найменшою вагою) буде модель №2.

## ВИСНОВКИ

1. Сітчасті циліндричні оболонки нульової гаусової кривини здатні перекривати середні прольоти та є ефективним конструкціями покриття. Дослідження таких конструкцій з метою пошуку найбільш оптимального варіанту є актуальною задачею.
2. З -поміж інших факторів при незмінності інших можна виділити фактор висоти конструкції (стріли підйому криволінійної оболонки). При варіювання стрілою підйому оболонки в діапазоні, що дозволяється із конструктивних рекомендацій можна отримати декілька однакових моделей оболонки, що мають різні стрілу підйому. При зміні величини стріли підйому змінюється напружений й деформований стержнів поля оболонки й інших конструктивних груп її елементів.
3. Так, при розгляді моделей оболонок із відношенням сторін 1:2 та трьома значеннями стріли підйому: 2,41 м, 2,01 м, 1,61 м слід відзначити. Що чим вища стріла підйому моделі, тим менш деформативною вона є й тим менше напруженою. І, навпаки, чим більше поверхня прямує до площини, тим більші зусилля виникають в елементах такої оболонки й тим більші прогини відзначаються в середині поля оболонки.
4. Чим більше висота стріли підйому оболонки, тим вона є більш стійкою, хоча всі моделі, що досліджувалися, мають великий запас загальної стійкості. Загальна деформативність для всіх варіантів знаходиться в допустимих межах, тобто не перевищують гранично допустимого значення, обумовленого нормами [4].

5. Попередньо прийняті перерізи стержневих елементів моделей показали, що всі вони працюють із значним недонапруженням. Тому в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР були підібрані нові профілі для всіх конструктивних груп елементів та обчислена загальна вага для моделей, що досліджуються.
6. Вага моделей №1 та №2 (із різницею їх стріли підйому в 0,5 м) виявилася майже однаковою, а вага моделі №3 – найбільшою.
7. Тому згідно даних за рис.6.23 за критерієм матеріальної ефективності найбільш ефективною вважатимемо модель №2 з-поміж варіантів, які досліджувалися.

## ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. К.: Мінрегіон України, 2014. 15 с. (Національний стандарт України)
2. ГОСТ 8732-78 із змінами 1,2. Труби сталеві, безшовні
3. ДБН В.1.2.-2-2006 Навантаження і впливи
4. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини та переміщення. Вимоги проектування
5. 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.
6. Chilton J. Space Grid Structures. Taylor & Francis Group, 2007. 180 p.
7. Domingo A., Lazaro C., Sanchez-Avarez J. Practical aspects determining the modelling of the space structure for the free-form envelope enclosing Baku's Heydar Aliyev Cultural Centre. Proceedings of Conference: “IASS 2009. Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures”, September 28 – October 2, 2009, Valencia, Spain, pp.1-12
8. Grigorian M. Performance control for efficient design of double-layer grids under uniform loading. International Journal of Advanced Structural Engineering. vol. 6(1),2014, pp. 1–13
9. Yuan B., Ren F. M., Zhong G. Q. and Zhou J. Optimal Design of Spatial Grid Structure Using Group Search Optimization. Advanced Materials Research, vol. 243-249, 2011, pp. 6044–6048

10. Kabando E. K. and Gong J. An overview of long-span spatial grid structures failure case studies. *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 20(8), 2019, pp.1137–1152
11. Tian L., Wei J. and Hao J. Anti-progressive collapse mechanism of long-span single-layer spatial grid structures. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 144, 2018, pp. 270–282
12. Shmukler V., Reznik P. and Janiak T. Rationalization of space grid structure systems. Scientific session on applied mechanics X. Proceedings of the “10th International Conference on Applied Mechanics”, November 23, 2018, Bydgoszcz, Poland, pp.1–5
13. Yang X., Bai Y. and Ding F. Structural performance of a large-scale space frame assembled using pultruded GFRP composites. *Composite Structures*, vol. 133, 2015, pp. 986–996
14. Bai Y. and Yang X. Novel Joint for Assembly of All-Composite Space Truss Structures: Conceptual Design and Preliminary Study. *Journal of Composites for Construction*, vol. 17(1), 2013, pp. 130–138
15. Flager F., Adya A., Haymaker J. and Fischer M. A bi-level hierarchical method for shape and member sizing optimization of steel truss structures. *Computers & Structures*, vol. 131, 2014, pp. 1–11
16. Setareh M., Bacim F., Polys N., Jones B. “Development of the Web-Based Structure and Form Analysis System (SAFAS) for Architectural Education”. [online] [24.04.2024]. Available at: <http://worldcomp-proceedings.com/proc/p2013/MSV4074.pdf>
17. Zhao D., Zhang Yu, T. and Gao H. Form-finding and optimization for free form grid structures supported by branching columns based on updated force density method. *Structures*, vol. 44, 2022, pp. 1190–1203

18. Fu F., Parke G. A. R. Assessment of the Progressive Collapse Resistance of Double-Layer Grid Space Structures Using Implicit and Explicit Methods. *International Journal of Steel Structures*, vol. 18(3), 2018, pp. 831–842
19. Bilyk A. The choice of optimal constructive solutions of steel roof trusses. PhD thesis abstract. Kyiv National University of Construction and Architecture, 2009. (In Ukrainian)
20. Lakshmikandhan K. N., Senthil R., Jayachandran A. S., Sivakumar P. and Ravichandran R. Parametric Studies on the Behavior of Steel and Composite Space Structures. *International Journal of Space Structures*, vol. 25(3), 2009, pp. 169–183
21. Li Z. X. Structure mechanics analysis with different construction schemes in large-span space grid structure. *Advanced Materials Research*, vol. 788, 2013, pp. 534–537
22. Ashtul S.A., Patil S.N. Review on Study of Space Frame Structure System. *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 7(4), 2020, pp. 667–672
23. Editor(s): Chai H. Yoo, Sung C. Lee, Chapter 9 - Buckling of Thin Cylindrical Shell Elements, *Stability of Structures*, Butterworth-Heinemann, 2011, Pages 441-474, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385122-2.10009-0>.
24. J.-C. Debus, 4 - Finite element analysis of flexural vibration of orthogonally stiffened cylindrical shells with ATILA,  
Editor(s): Kenji Uchino, Jean-Claude Debus, In *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Applications of ATILA FEM Software to Smart Materials*, Woodhead Publishing, 2013, Pages 69-93, <https://doi.org/10.1533/9780857096319.2.69>.
25. A study of cylindrical shells under global bending in the elastic-plastic range. Lei Chen, Cornelia Doerich, J. Michael

Rotter./Steel Construction/ Design and Research. First published: 25 November 2008. <https://doi.org/10.1002/stco.200890008>

26. 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
27. 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
28. 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
29. 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
30. 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
31. Єврокод 3, СНиП 2.01.07-85
32. СНиП 2.01.07-85
33. Єврокоду EN 1993-1-6 (2007)

## **ДОДАТКИ**

Сумський національний аграрний університет

Факультет будівництва та транспорту

# Дослідження роботи циліндричної стержньової оболонки покриття

Студент: здобувач 2м курсу, Андрущечко Юрій Олегович

Керівник: к.т.н., доцент Срібняк Н.М.

Суми, 2025

# Актуальність теми

- ▶ **Сітчасті циліндричні оболонки** – це ефективні конструкції, що поєднують високу міцність, малу вагу та економічність матеріалів. Завдяки своїй геометрії та сітчастій структурі вони здатні рівномірно розподіляти навантаження, забезпечуючи стійкість до зовнішніх впливів, зокрема вітрових і сейсмічних навантажень.
- ▶ Основна **перевага** таких оболонок – оптимальне використання матеріалу. Сітчаста структура дозволяє зменшити вагу конструкції без втрати несучої здатності, що робить їх ідеальними для великих прольотів та архітектурно складних споруд. Крім того, вони мають високу жорсткість і можуть працювати в умовах значних навантажень, зберігаючи форму та цілісність.
- ▶ Дослідження конструкцій такого типу є **актуальним завданням**.

**Метою роботи** є оцінка напружено-деформованого стану, стійкості та матеріалоемності трьох моделей сітчастих металевих оболонок покриття циліндричної форми, що відрізняються одна від одної лише висотою стріли підйому. Кінцевою метою є виявлення моделі, що буде мати найменшу вагу.

### **Задачі роботи:**

- ❖ ознайомитися з існуючими конструктивними рішеннями сітчастих оболонок; ознайомитися з методами, принципами створення скінченоелементних моделей сітчастих циліндричних оболонок використовуючи МСЕ;
- ❖ в середовищі ПК Ліра-САПР змодельовати три скінченоелементні стержньові моделі циліндричних оболонок з однаковими розмірами в плані, параметрами жорсткості, параметрами навантаження та граничними умовами. Відмінною в цих моделях буде лише величина стріли підйому оболонки.

- ❖ Виконати статичний розрахунок моделей в пружній стадії роботи
- ❖ Виконати оцінку та порівняння параметрів напружено-деформованого стану конструктивних груп елементів оболонок, параметрів стійкості
- ❖ Оцінити ступінь використання площі попередньо прийнятих перерізів оболонок. Прийняти нові профілі елементів для у всіх конструктивних груп стержнів.
- ❖ З урахуванням ваги нових профілів елементів визначити вагу кожної моделі. Зробити висновки щодо матеріалоемності кожної моделі.

**Об'єкт дослідження** – варіанти (СЕ схеми) трьох сітчастих оболонок циліндричного типу, що мають різну стрілу підйому.

**Предметом дослідження** виступають зусилля в стержнях СЕ моделей, переміщення вузлів СЕ моделей, параметри стійкості, ступінь використання попередньо прийнятих трубчастих перерізів, а також матеріалоемність моделей.

### **Апробація результатів дослідження**

Срібняк Н.М., Галушка С.А., Безсонов К.С., Андрушечко Ю.О.  
Ефективні сталеві конструкції для покриття будівель. Міжнародна науково-практична конференція «GLOBAL TRENDS IN SCIENCE AND EDUCATION» 10-12.03.2025 року Київ, Україна

# ► Методи дослідження

- ▶ **1) *Метод аналізу інформації.*** Включає в себе пошук, класифікацію, аналіз інформації із різних джерел. В результаті аналізу передбачається зробити певні висновки щодо формулювання проблеми дослідження, його мети та задач
- ▶ **2) *Метод скінчених елементів.*** Метод скінченних елементів (МСЕ) є одним із найефективніших числових методів розрахунку будівельних конструкцій, включаючи сітчасті стержньові оболонки. Його використання дозволяє детально аналізувати напружено-деформований стан складних конструкцій, прогнозувати їхню поведінку під різними видами навантажень і оптимізувати проєктні рішення.
- ▶ **3) *Конструювання елементів за будівельними нормами проєктування***

Програмний комплекс ЛІРА-САПР є одним із найпоширеніших інструментів для розрахунку та проєктування металевих конструкцій. Однією з його ключових можливостей є автоматизований підбір сталевих перерізів у модулі "Метал", що дозволяє оптимізувати конструкцію відповідно до нормативних вимог та забезпечити ефективне використання матеріалу.
- ▶ **4). *Аналітична обробка результатів числового розрахунку за допомогою Microsoft Excel***

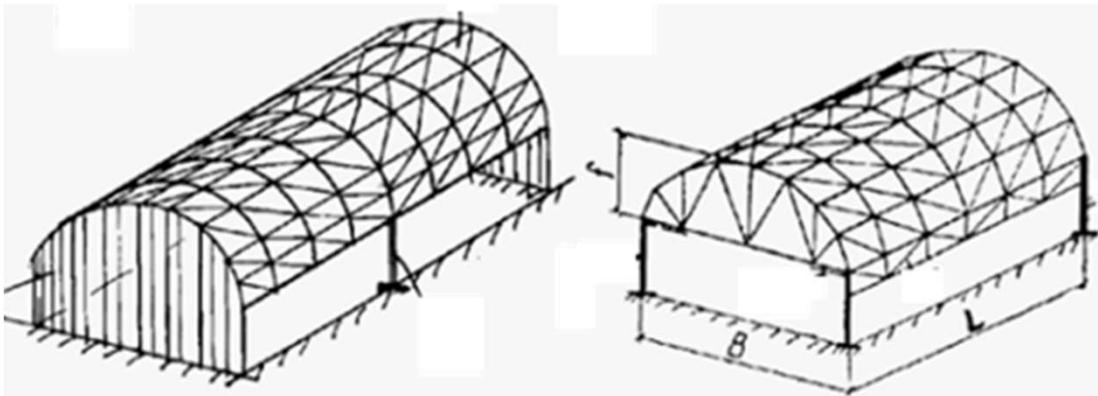
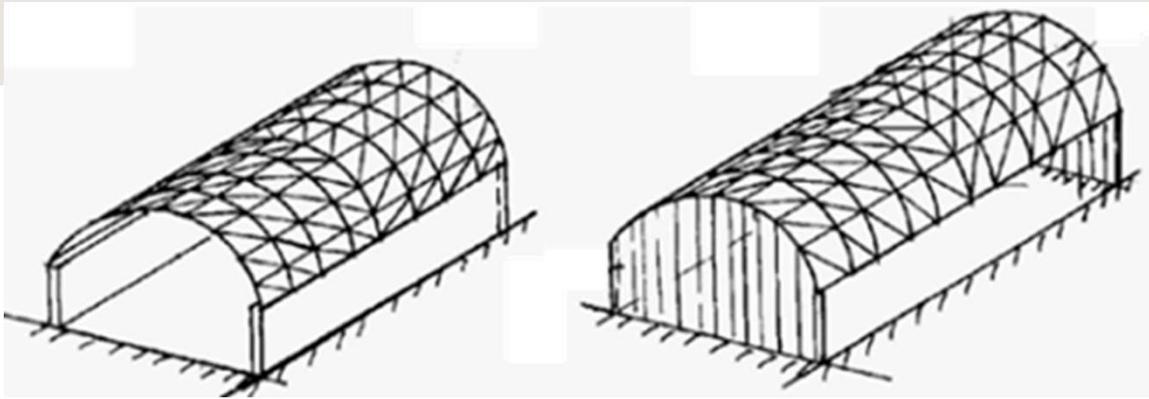


Рис. 1 Приклади можливих геометричних та конструктивних вирішень сітчастих циліндричних оболонок

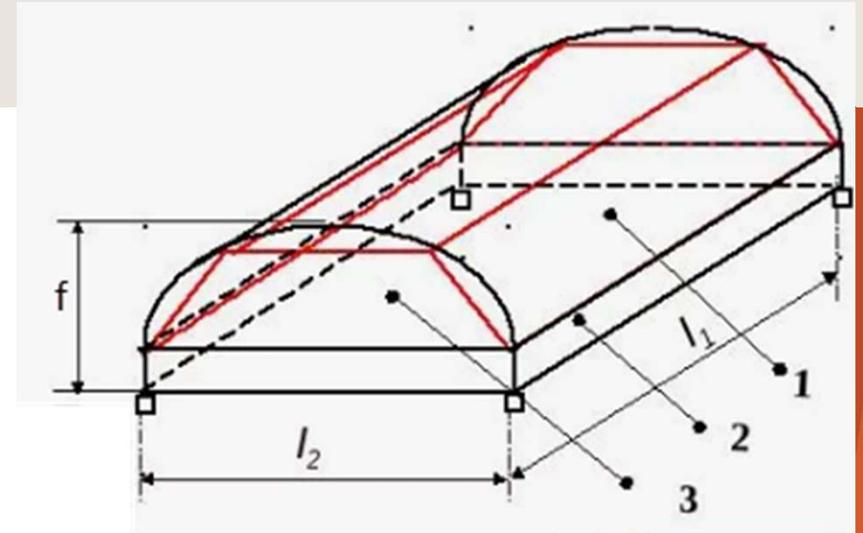


Рис. 2. Елементи циліндричної оболонки:  
1-оболонка (шкаралупа);  
2-бортовий елемент;  
3- торцева діафрагма жорсткості

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 частину дуги кола**, а рідше - за еліпсом або іншою математичною кривою високих порядків. Як правило, виготовляються такі оболонки із залізобетону або в сітчастому стержньовому варіанті.

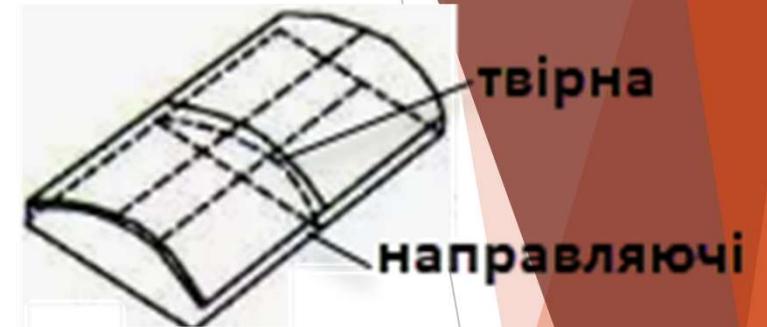
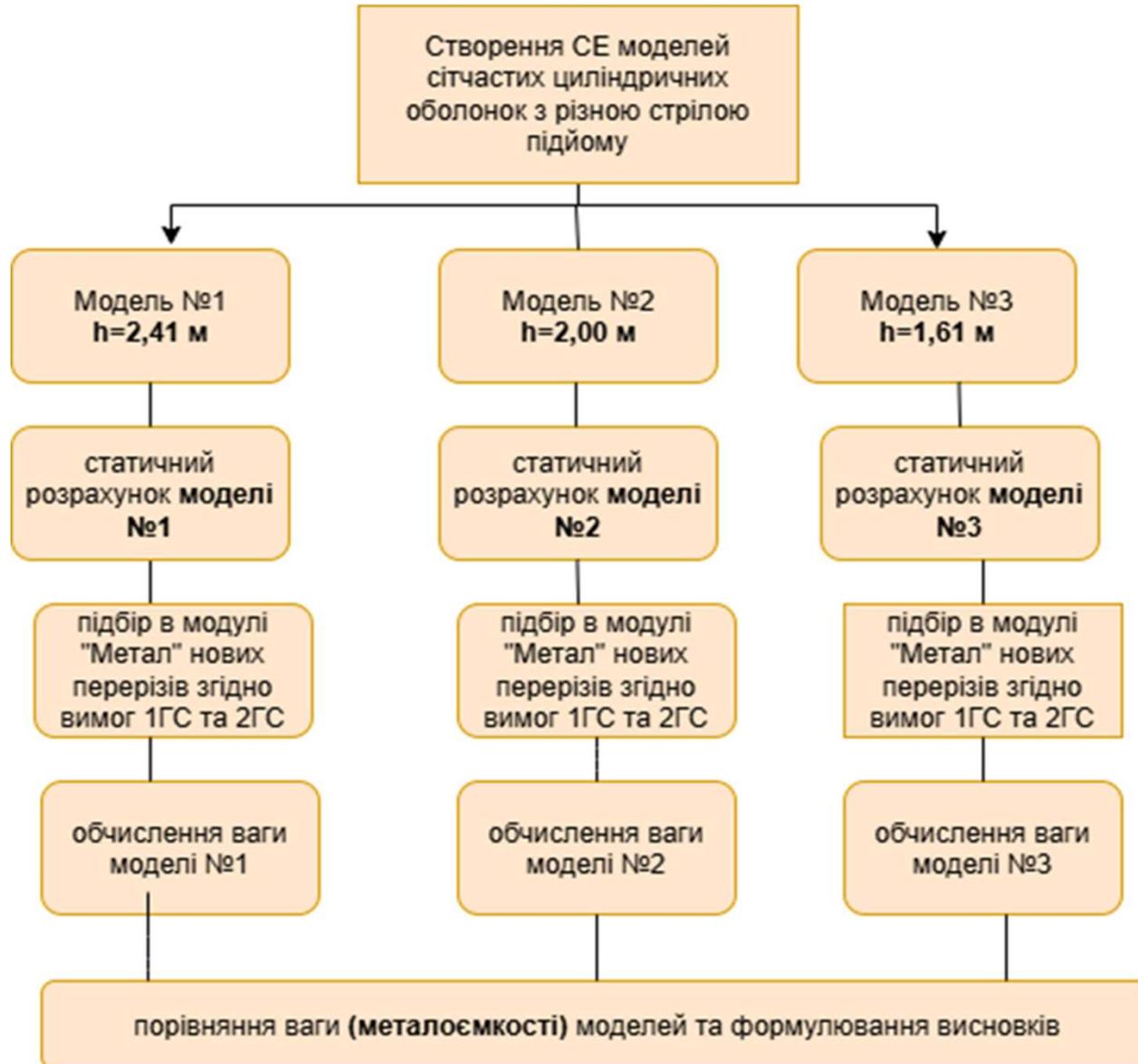
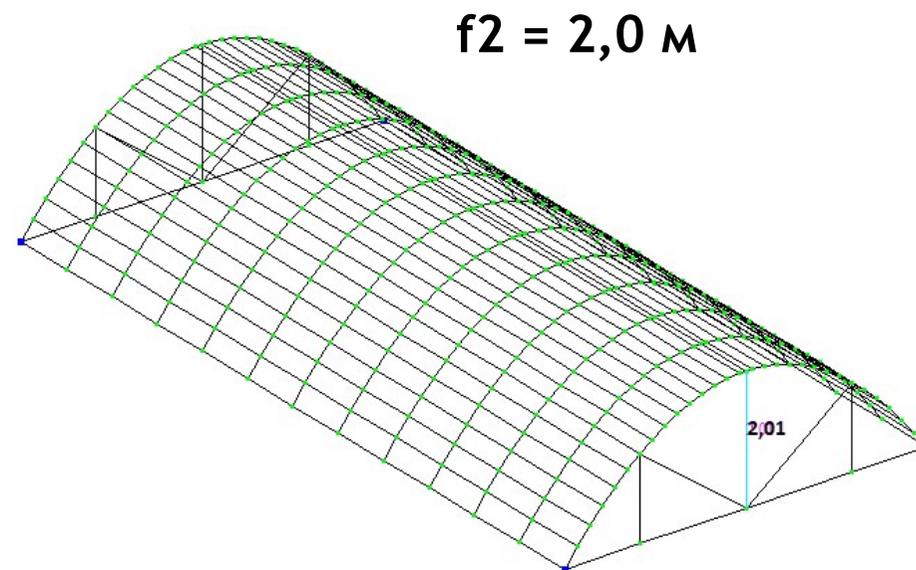
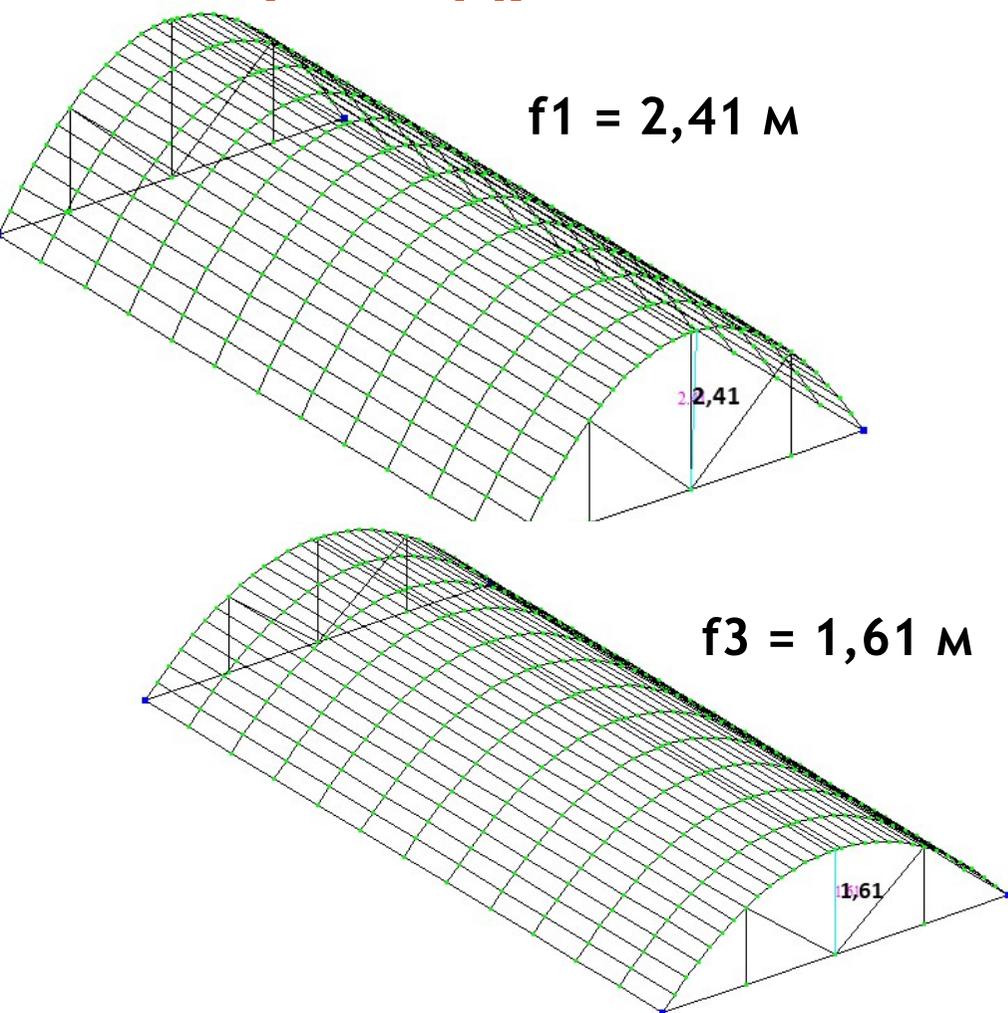


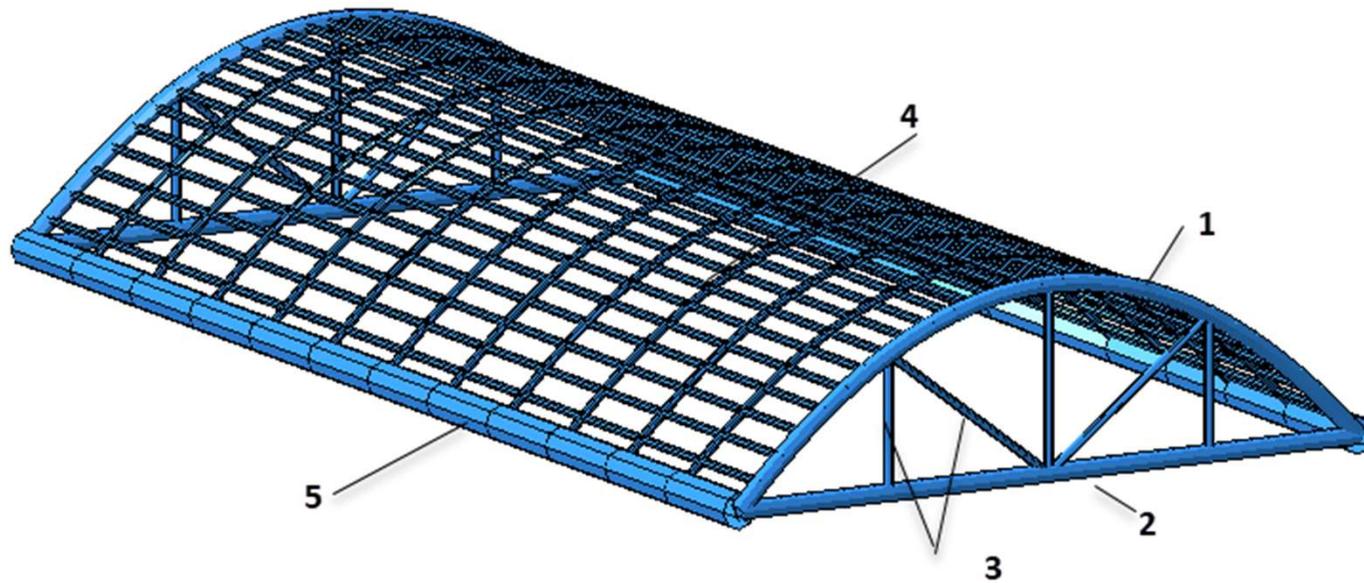
Рис. Принципи формоутворення циліндричної оболонки

# Алгоритм виконання числового експерименту



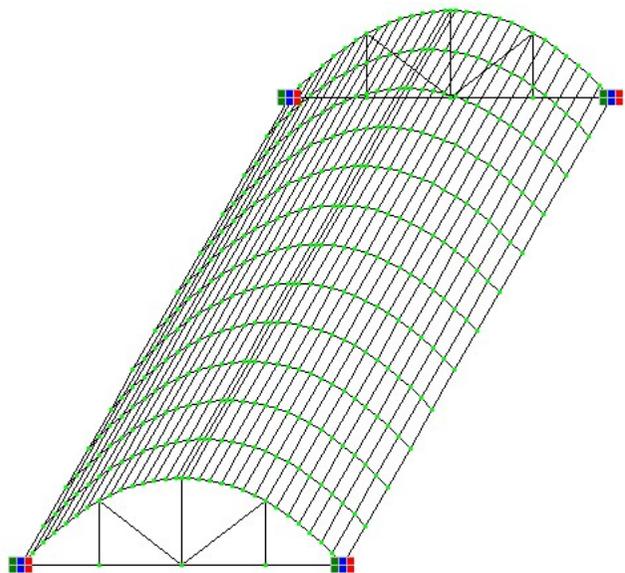
# Скінченоелементні моделі сітчастої циліндричної оболонки



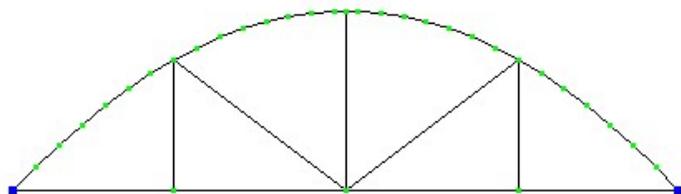


- Рис. Просторова модель циліндричної стержньової оболонки на прикладі моделі №1:
- стержні верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості -1;
- стержні нижнього поясу торцевої діафрагми жорсткості -2;
- стержні решітки торцевої діафрагми жорсткості-3;
- стержні поля оболонки -4;
- бортові елементи-5

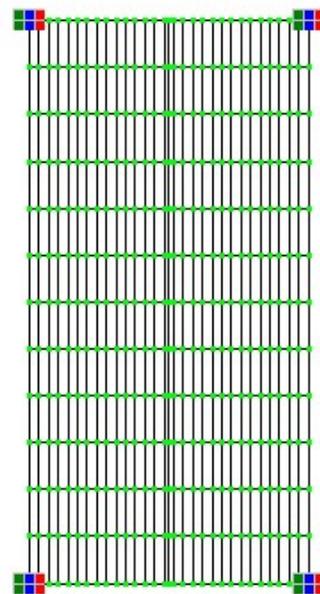
Аксонетрична СЕ модель  
оболонки (на прикладі моделі №1)



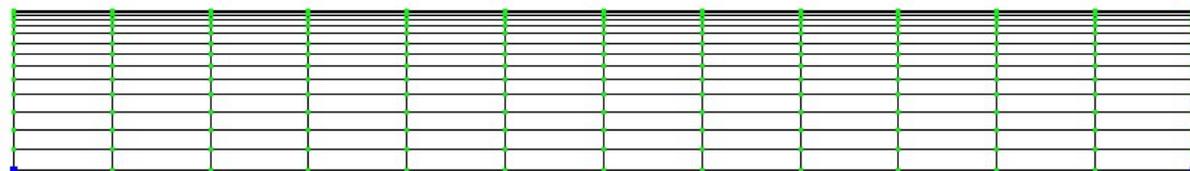
Вид в площині XOZ



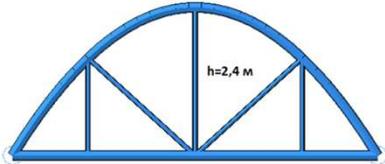
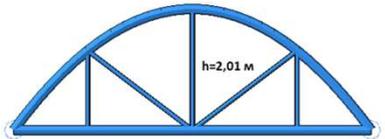
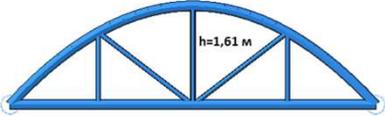
Вид в площині XOY



Вид в площині YOZ



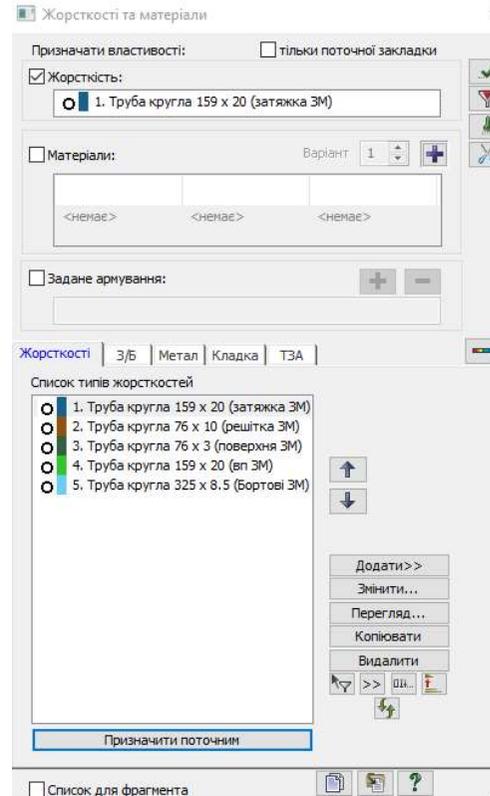
Таблиця 5.1. Геометричні характеристики моделей циліндричної оболонки, що досліджуються

№ моделі	Розміри в плані оболонки, $b \times l$ , м	Висота оболонки (стріла підйом $y$ ), м	Формула плоскої твірної в площині XOZ	Вид оболонки в площині XOZ
1	6,0x12,0	2,41	$z = -2 \frac{x^2}{4,5^2}$	
2		2,01	$z = -2 \frac{x^2}{3,75^2}$	
3		1,61	$z = -2 \frac{x^2}{2,8^2}$	

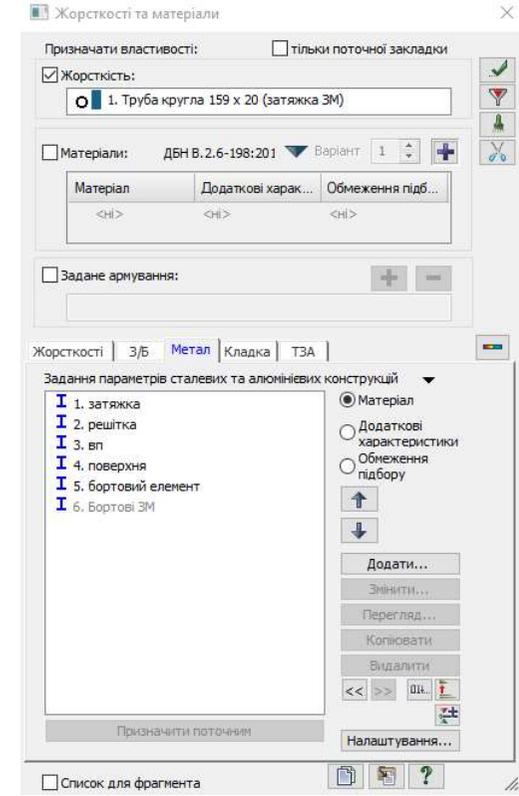
Таблиця 2- Характеристики жорсткостей конструктивних елементів структурного покриття (при ітераційному розрахунку №1)

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м <sup>2</sup>	R, т/м <sup>3</sup>	μ	Сталь С235	q, т/м
1. Стержні верхнього поясу діафрагми жорсткості	Труба ТБ 154×20 (ДСТУ 8732-78) Ст4 пс	2,1·10 <sup>7</sup>	7,85	0,3	Ст4 пс	0.068531
2. Стержні нижнього поясу діафрагми жорсткості	Труба ТБ 154×20 (ДСТУ 8732-78) Ст4 пс				Ст4 пс	0.068531
3. Елементи решітки діафрагми жорсткості	Труба ТБ 76 × 10 (ДСТУ 8732-78)				Вст2пс	0.01627
4. Стержні криволінійної поверхні	Труба ТБ 76 × 3 (ДСТУ 8732-78)				Ст4пс	0.00539867
5. Бортові елементи	Труба ТБ 328 × 8,5 (ДСТУ 8732-78)				Ст4пс	0.0663185

Призначення параметрів жорсткостей



Призначення параметрів матеріалу



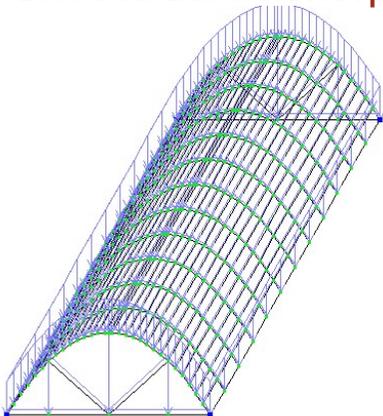
Таблиця 3. Завантаження, що прийнято до розрахунку

№ 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

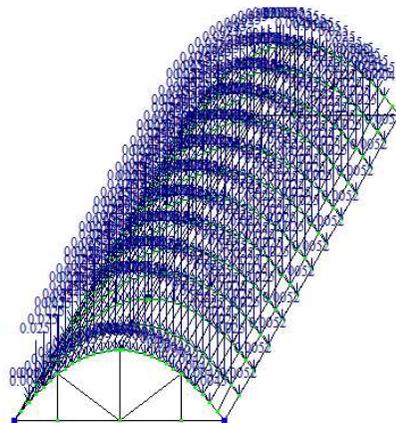
Таблиця 4. Збір навантажень на 1м2 покриття

Назва	Характеристичне значення навантаження, (кН/м <sup>2</sup> )	Коеф. надійності за навантаженням $\gamma_f$	Розрахункове навантєння кН/м
<b>I. Постійні навантаження</b>			
Власна вага конструкції (згідно призначених жорсткостей)	Автоматично визначається в ПК «Ліра-САПР»		
Склопакет однокамерний (світлопрозоре заскління)Гп	0,192	1.05	0,201
<b>ВСЬОГО ПОСТІЙНЕ:</b>	0,192		0,201
<b>II. Тимчасове навантаження</b>			
Снігове навантаження (за ДБН В.1.2-2:2006, додаток Е) для м. Суми (1670 Па=1,67 кН/м <sup>2</sup> )	1,67	1.14	1,90
<b>Повне навантаження (без врахування власної ваги)</b>	1,862		2,10

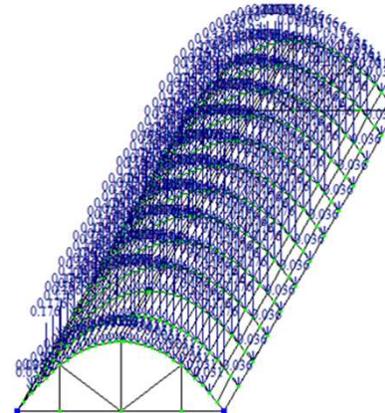
Завантаження 1.  
Власна вага конструкції



Завантаження 2.  
Власна вага покрівлі

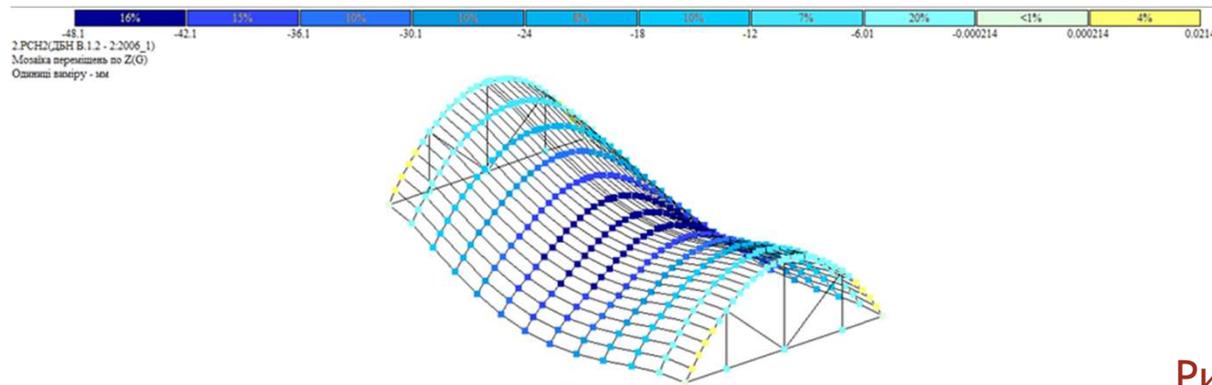


Завантаження 3.  
Снігове навантаження



# АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ

Рис. Деформована схема та мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема: для схеми №1 від РСН 2



Модель №1 циліндричної оболонки ( з найбільшою стрілою підйому) характеризується найменшим вертикальним прогином, тобто має найменшу деформативність й найбільшу жорсткість. А модель з найменшою стрілою підйому має найбільшу деформативність й найбільший вертикальний прогин. Значення максимальних прогинів для всіх моделей не перевищують значення гранично допустимого прогину згідно норм ДСТУ «Прогини та переміщення»

Рис. Максимальні переміщення fz вузлів скінченоелементної схеми від РСН2

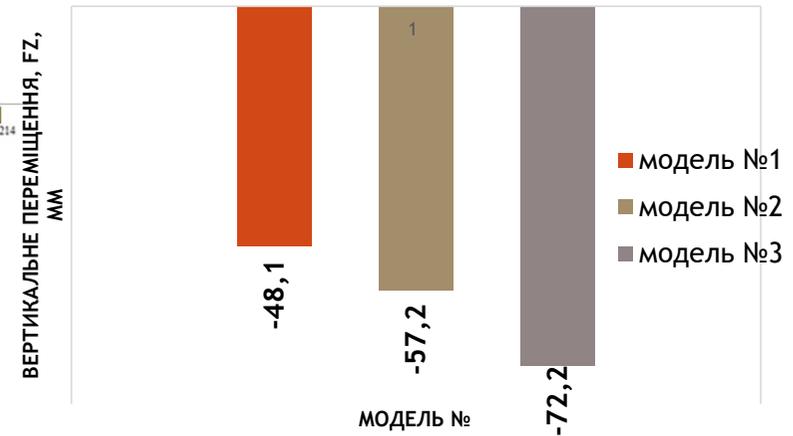


Рис. Графіки прогинів вздовж прольоту (l=12 м) для сітчастих циліндричних оболонок

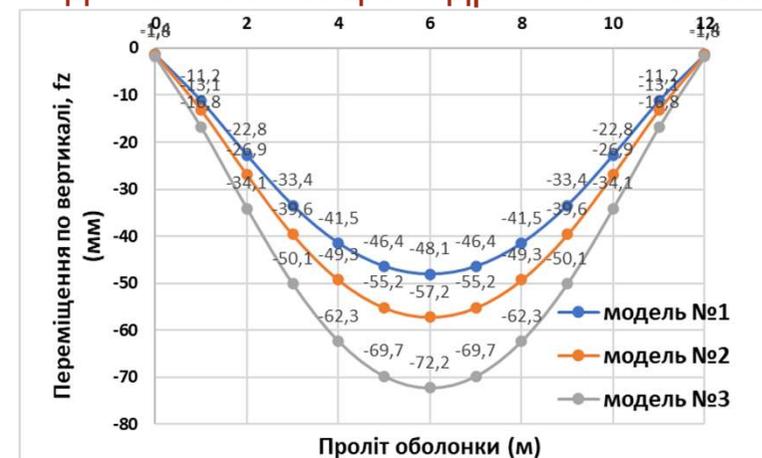


Рис. Мозаїка зусиль N у стержнях від РСН2 для моделі №1

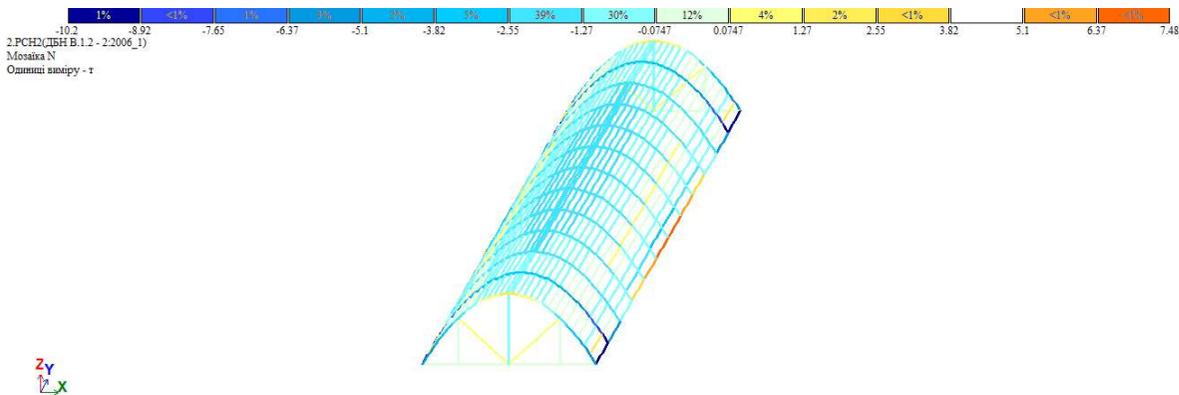


Рис. Епюра зусилля N в стержнях оболонки, що формують її поверхню від РСН2 на прикладі СЕ моделі №1

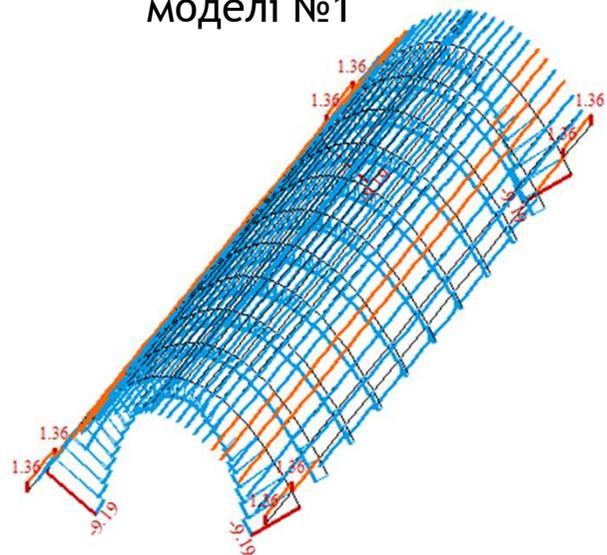


Рис. Епюра зусилля N в елементах торцевої діафрагми жорсткості від РСН2 на прикладі СЕ моделі №1

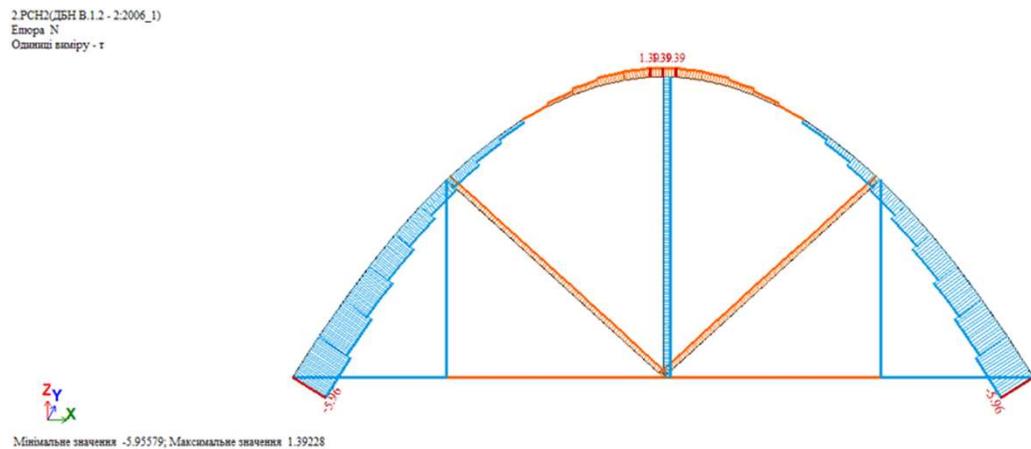


Рис. Епюра зусилля N в бортових елементах від РСН2 на прикладі СЕ моделі №1

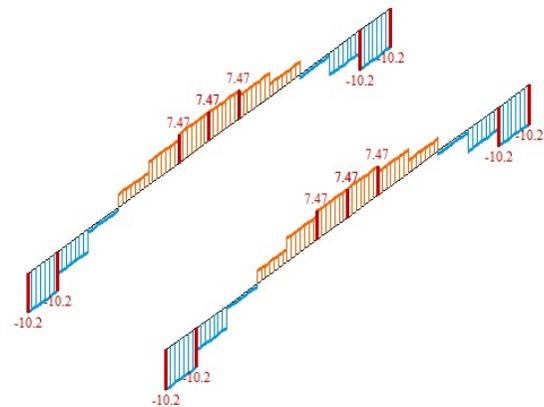


Рис.1 Графік максимальних зусиль N в стержнях **верхнього поясу** торцевої діафрагми жорсткості

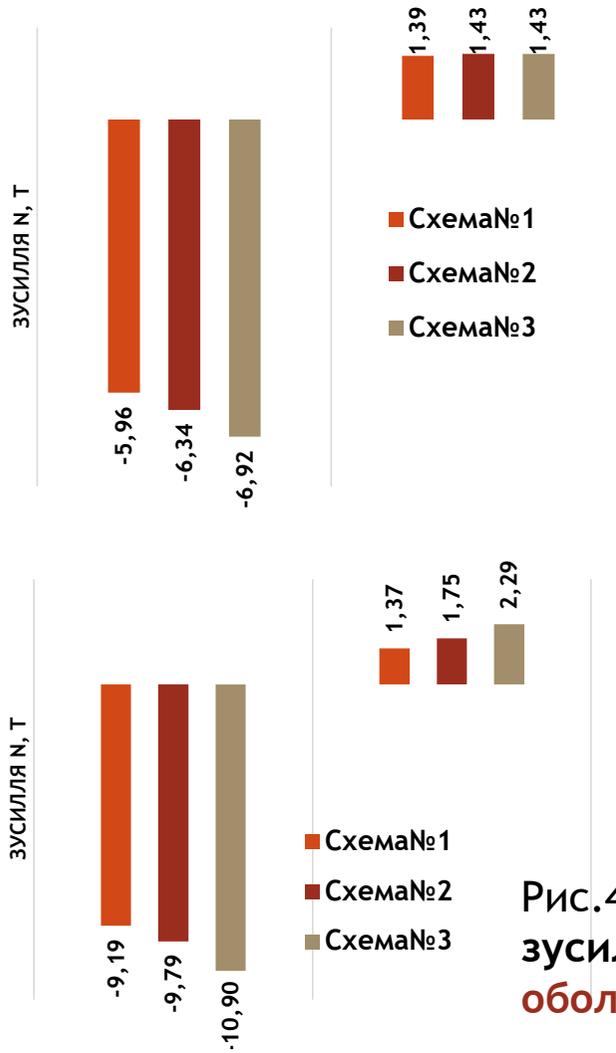


Рис.2 Графік максимальних зусиль N в стержнях **решітки** торцевої діафрагми жорсткості

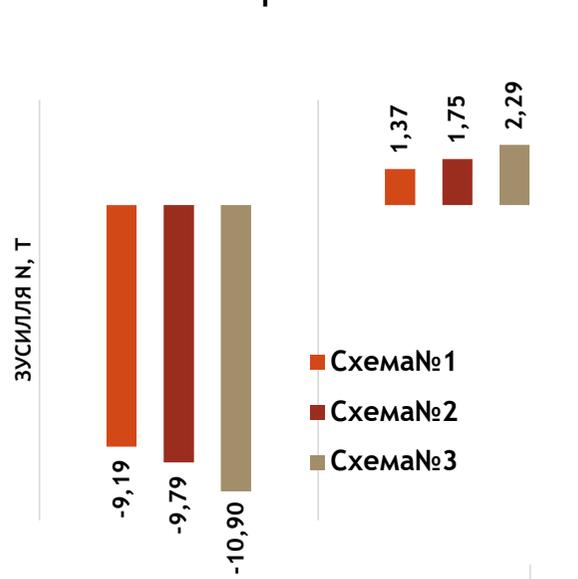


Рис.3 Графік максимальних зусиль N (τ) в **елементах затяжки** торцевої діафрагми жорсткості

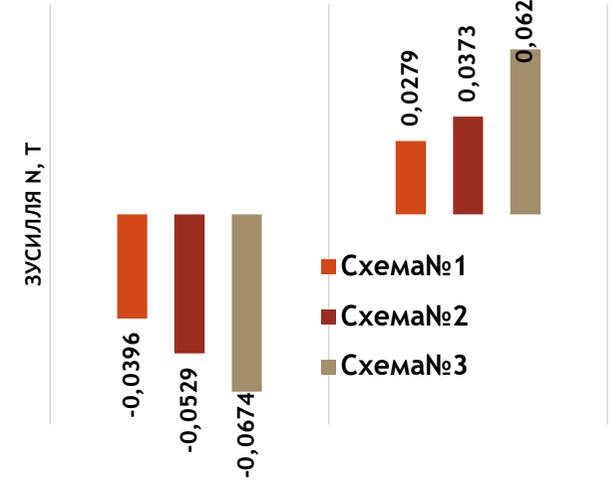


Рис.4 Графік максимальних зусиль N (τ) в **стержнях поля оболонки**

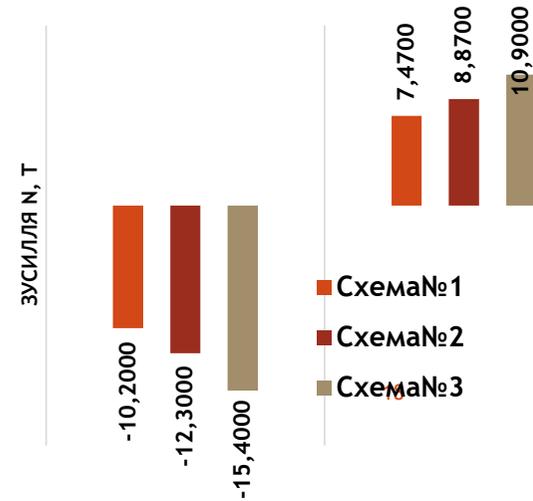


Рис.5 Графік максимальних зусиль N (τ) в **бортових елементах оболонки**

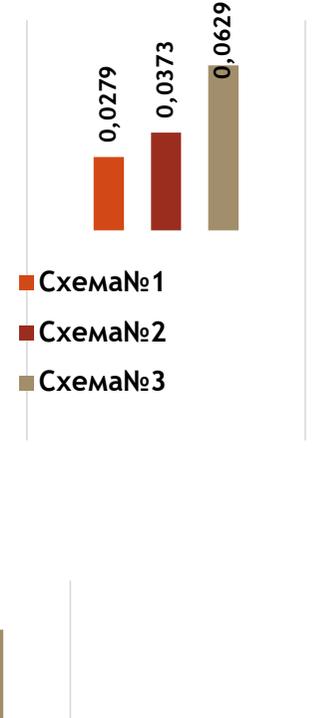


Рис.6 Графік максимальних моментів вигину  $M_y$  (тм) в бортових елементах оболонки

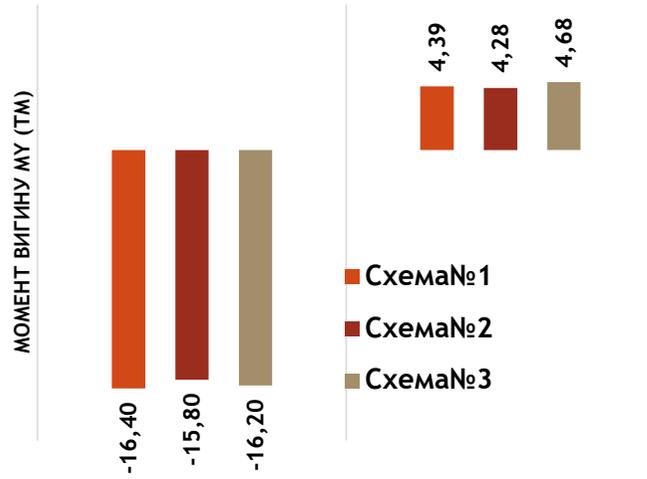
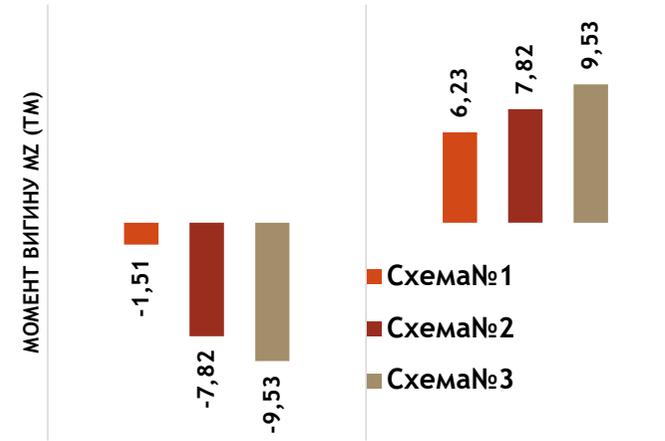


Рис.7 Графік максимальних моментів вигину  $M_z$  (тм) в бортових елементах оболонки



# Мозаїка результатів при розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності

схема №1

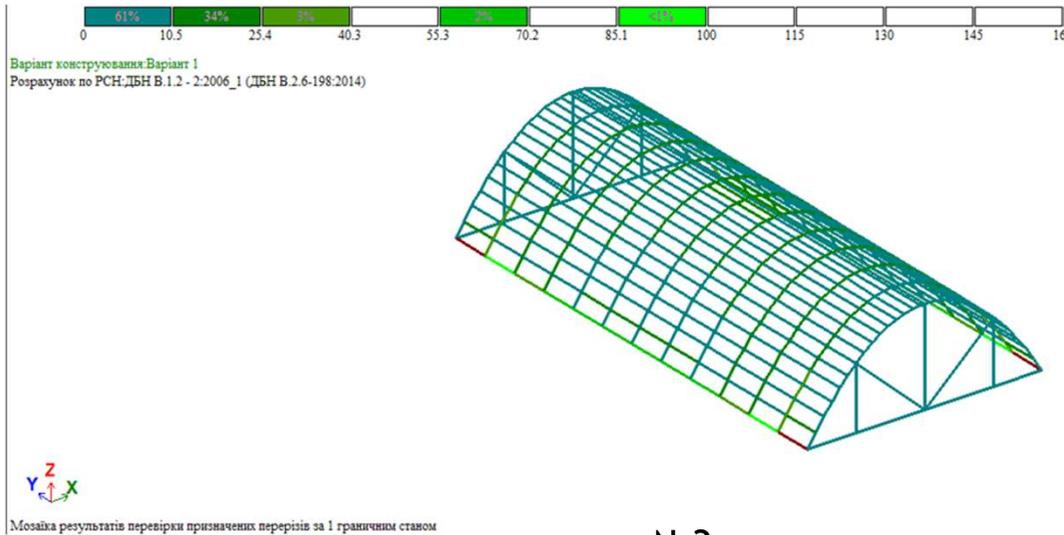


схема №2

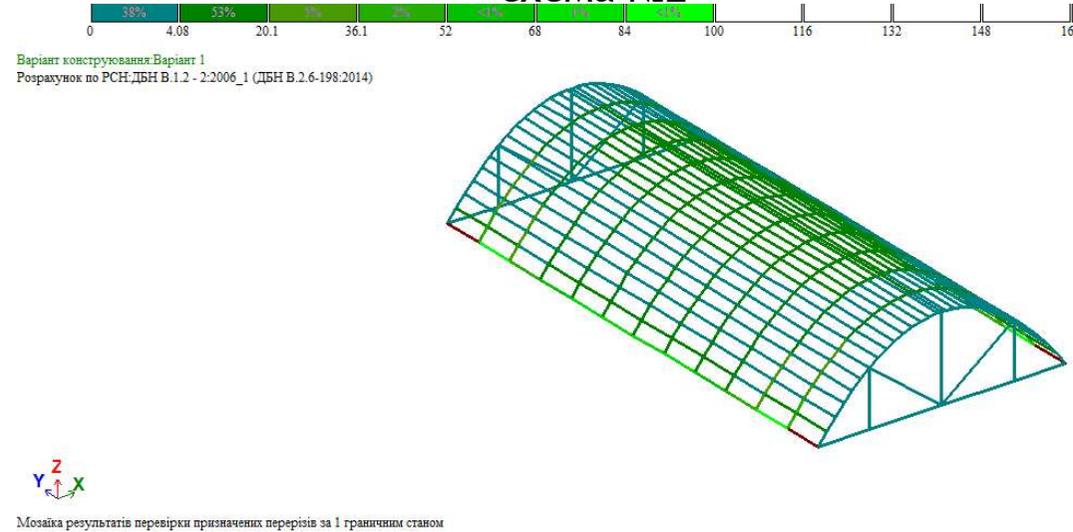
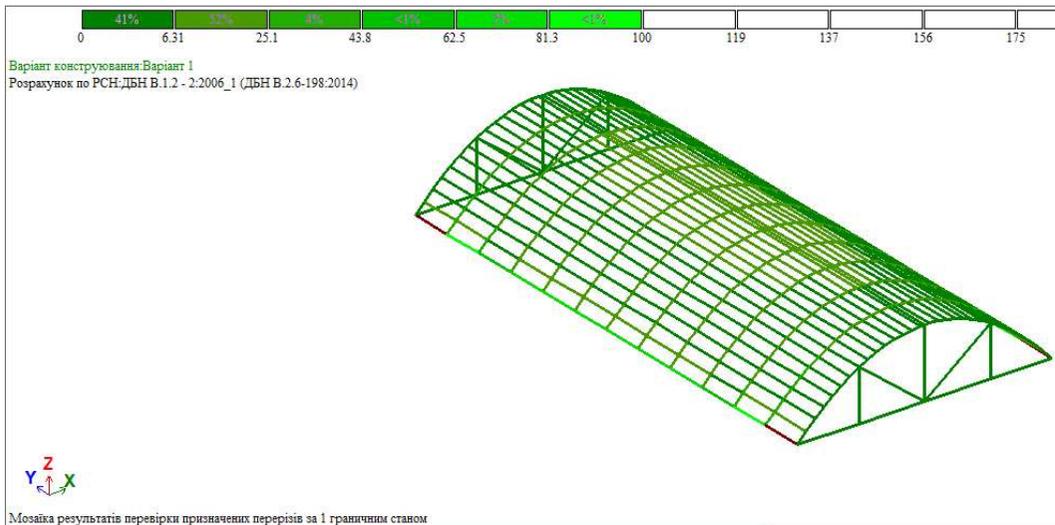


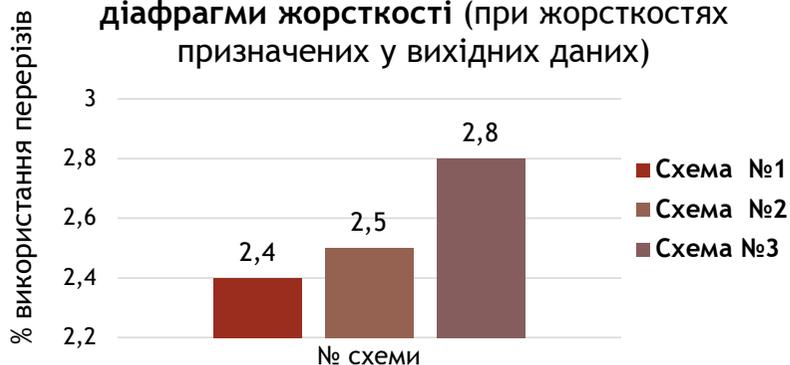
схема №3



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

Назва конструктивної групи стержнів	1 ГС		
	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Верхній пояс торцевої діафрагми жорсткості	2,4	2,5	2,8
Решітка торцевої діафрагми жорсткості	1,9	1,7	1,8
Поле оболонки	37	39,1	42,8
Бортові елементи	86,3	89,4	98,1

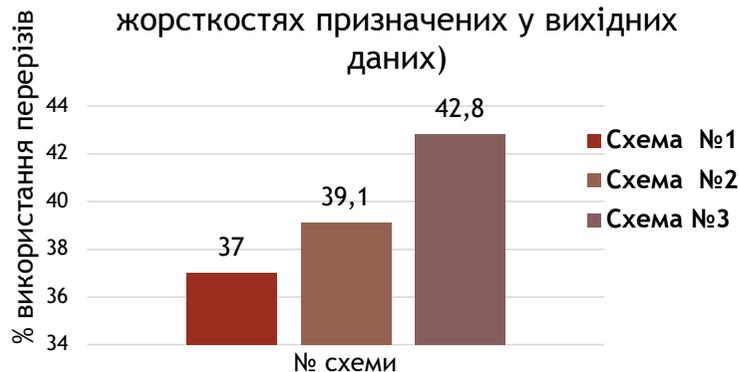
Максимальний % використання перерізів елементів верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості (при жорсткостях призначених у вихідних даних)



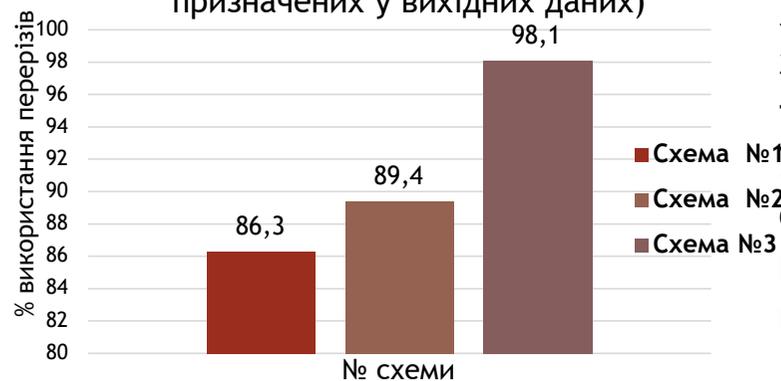
Максимальний % використання перерізів решітки торцевої діафрагми жорсткості (при жорсткостях призначених у вихідних даних)



Максимальний % використання перерізів елементів поля оболонки (при жорсткостях призначених у вихідних даних)



Максимальний % використання перерізів бортових елементів (при жорсткостях призначених у вихідних даних)



Так, очевидно із табл.6 найбільш недонапружені конструктивних груп для видів будуть найменшим зусиль, що виникають у моделях №2 та №3. У всіх перерізів стержнів решітки жорсткості та елементів діафрагми жорсткості ма Несуча здатність перерізів конструктивних груп вик 2,8 %, тобто недонапруж значить, що для стержні треба прийняти стержні У всіх моделях несуча зд оболонки знаходиться в про те, що ця група конс недонапруженою більше

Так, очевидно із табл.1 рис. 1-4, що найбільш недонапруженими є елементи усіх конструктивних груп для моделі №1, де і зусилля всіх видів будуть найменшими в порівнянні із величинами зусиль, що виникають у відповідних елементах в моделях №2 та №3.

У всіх моделях несуча здатність перерізів стержнів решітки торцевої діафрагми жорсткості та елементів верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості майже не використовується.

Несуча здатність перерізів стержнів цих конструктивних груп використовується всього на **1,7-2,8 %**, тобто недонапруження становить **97%**.

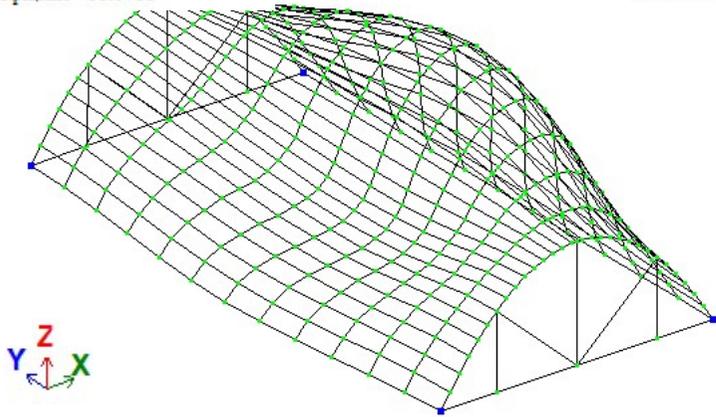
**Це значить, що для стержнів решітки та верхнього поясу треба прийняти стержні значно меншого перерізу.**

У всіх моделях несуча здатність стержнів поля оболонки знаходиться в межах **37-42,8%**, що свідчить про те, що **ця група конструктивних стержнів теж є недонапруженою більше ніж на майже 60%**.

## Аналіз стійкості моделей, що досліджуються

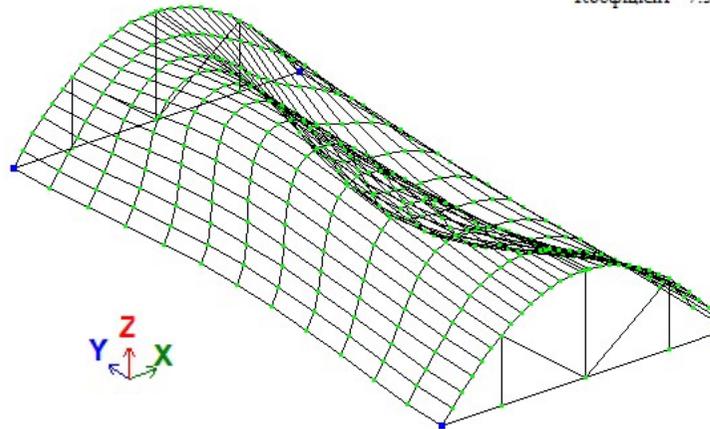
Форма втрати стійкості для моделі №1 (k=10,18) від РСН2

2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Форма втрати стійкості у гл. с. 1  
Коефіцієнт 10.1788



Форма втрати стійкості для моделі №2 (k=8,73) від РСН2

2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Форма втрати стійкості у гл. с. 1  
Коефіцієнт 8.72951



Форма втрати стійкості для моделі №3 (k=7,53) від РСН2

2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Форма втрати стійкості у гл. с. 1  
Коефіцієнт 7.5337

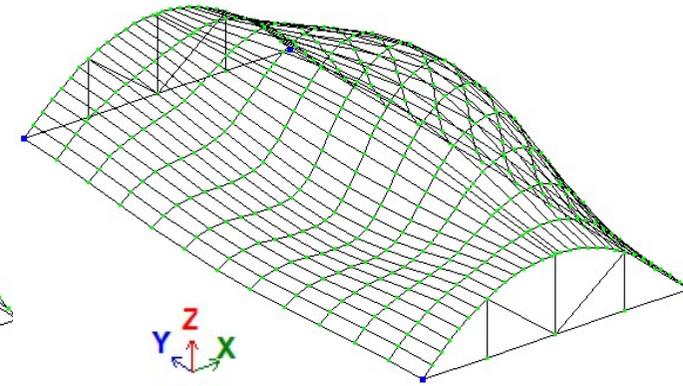
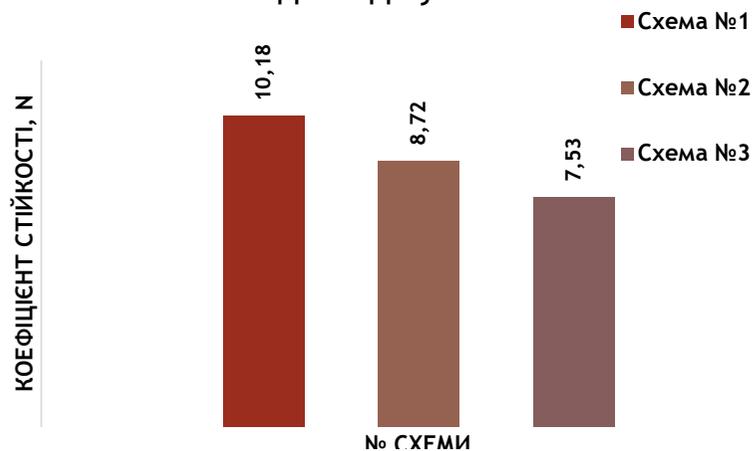


Рис. Коефіцієнт стійкості k для моделей, що досліджуються



Стійкість оболонки нульової гаусової кривини збільшується прямопропорційно збільшенню її стріли підйому. Тобто, **чим більшу висоту має напівциліндрична поверхня, тим вона буде стійкішою**, і навпаки, чим більше її поверхня наближається до площини, тим менш стійкою вона стає. У всіх моделях, що досліджуються **має місце значний запас стійкості** (коефіцієнт k варіюється від 7,5 до 10). Тобто для втрати конструкцією стійкості її треба завантажити в 7,5-10 разів більшим навантаженням, ніж те, що прикладено за розрахунком.

# Визначення нових перерізів стрижнів

Таблиця 1. Підбір елементів верхнього поясу торцевої діафрагми жорсткості поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 159х20	Ст4пс	ТБ 28х2,8	0.00173941	16,04	0,0279
2			ТБ 32х2,5	0.00181804	14,97	0,027216
3			ТБ32х2,8	0.0020155	14,00	0,028217

Таблиця 2 Підбір елементів нижнього поясу торцевої діафрагми жорсткості поясу після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 159х20	Ст4пс	ТБ 25х2,5	0.00138664	12,0	0,01664
2			ТБ 25х2,5	0.00138664	12,0	0,01664
3			ТБ 25х2,5	0.00138664	12,0	0,01664

Таблиця 3 Підбір елементів решітки торцевої діафрагми жорсткості після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 76х10	ВСт3пс	ТБ 25х2,5	0.00138664	20,62	0,028593
2			ТБ 25х2,5	0.00138664	18,09	0,025084
3			ТБ 25х2,5	0.00138664	15,72	0,021798

Таблиця 4 Підбір елементів поля оболонки після ітераційного розрахунку №1

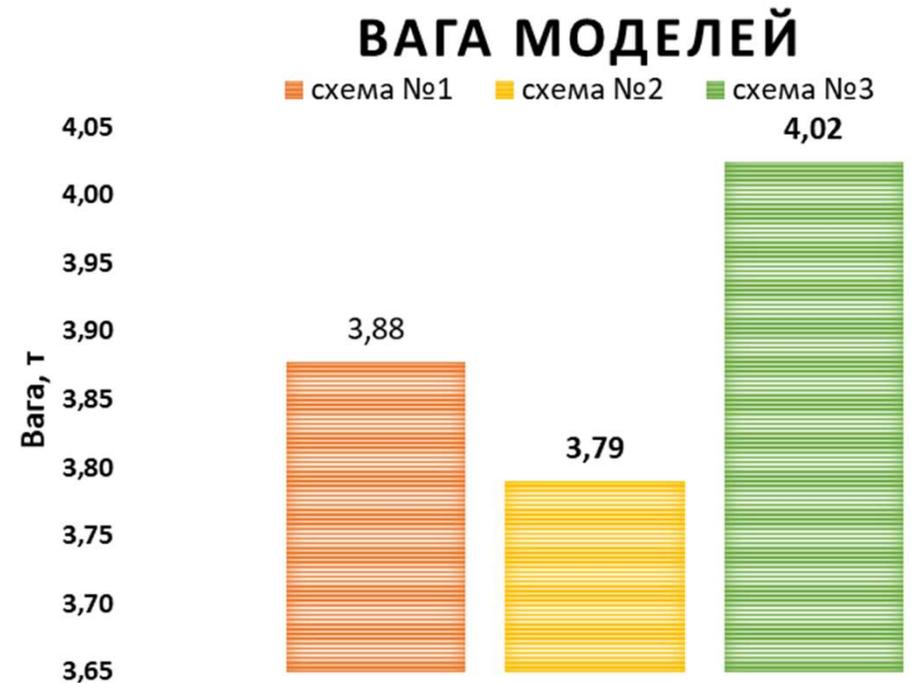
№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 76х3	Ст4пс	ТБ 32х2,8	0.0020155	436,21	0,879181
2			ТБ 28х3	0.00184886	430,33	0,79562
3			ТБ 38х2,8	0.00242965	425,05	1,032723

Таблиця 5. Підбір бортових елементів після ітераційного розрахунку №1

№ схеми	Попередньо прийнятий переріз	Сталь	Профіль труби	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	ТБ 325х8,5	Ст4пс	ТБ 500х9,5	0.121895	24,0	2,92548
2			ТБ 500х9,5	0.121895	24,0	2,92548
3			ТБ 500х9,5	0.121895	24,0	2,92548

Чим пологіша оболонка, тим більші за модулем зусилля  $N$  виникають в її стержнях. І навпаки - чим більша стріла підйому циліндричної оболонки, тим менше стержні, що утворюють її поверхню, напружені. А, отже, як результат вага поля найпологішої оболонки (**модель №3**) буде найбільшою, а вага поля оболонки найбільш вщарушеної (**модель №1**) - буде найменшою .

Підрахунок ваги усієї моделі циліндричної оболонки показав, що найбільшу вагу буде мати найбільш пологога модель - модель №3. Вага моделей №1 та 2 є майже однаковими. Вага моделі №1 всього в 1,02 рази (на 2%) перевищує вагу моделі №2.



# ВИСНОВКИ

1. Сітчасті циліндричні оболонки нульової гаусової кривини здатні перекривати середні прольоти та є ефективним конструкціями покриття. Дослідження таких конструкцій з метою пошуку найбільш оптимального варіанту є актуальною задачею.
2. З -поміж інших факторів при незмінності інших можна виділити фактор висоти конструкції (стріли підйому криволінійної оболонки). При варіювання стрілою підйому оболонки в діапазоні, що дозволяється із конструктивних рекомендацій можна отримати декілька однакових моделей оболонки, що мають різні стрілу підйому. При зміні величини стріли підйому змінюється напружений й деформований стержнів поля оболонки й інших конструктивних груп її елементів.
3. Так, при розгляді моделей оболонок із відношенням сторін 1:2 та трьома значеннями стріли підйому: 2,41 м, 2,01 м, 1,61 м слід відзначити. Що чим вища стріла підйому моделі, тим менш деформативною вона є й тим менше напруженою. І, навпаки, чим більше поверхня прямує до площини, тим більші зусилля виникають в елементах такої оболонки й тим більші прогини відзначаються в середині поля оболонки.
4. Чим більше висота стріли підйому оболонки, тим вона є більш стійкою, хоча всі моделі, що досліджувалися, мають великий запас загальної стійкості. Загальна деформативність для всіх варіантів знаходиться в допустимих межах, тобто не перевищують гранично допустимого значення, обумовленого нормами [4].

- 5.** Попередньо прийняті перерізи стержневих елементів моделей показали, що всі вони працюють із значним недонапруженням. Тому в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР були підбрані нові профілі для всіх конструктивних груп елементів та обчислена загальна вага для моделей, що досліджуються.
- 6.** Вага моделей №1 та №2 (із різницею їх стріли підйому в 0,5 м) виявилася майже однаковою. А вага моделі №3- найбільшою.
- 7.** Тому згідно даних за рис.6.23 за критерієм матеріальної ефективності найбільш ефективною вважатимемо модель №2 з-поміж варіантів, які досліджувалися.

**SCI-CONF.COM.UA**

# **GLOBAL TRENDS IN SCIENCE AND EDUCATION**



**PROCEEDINGS OF II INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE  
MARCH 10-12, 2025**

**KYIV  
2025**

# **GLOBAL TRENDS IN SCIENCE AND EDUCATION**

Proceedings of II International Scientific and Practical Conference

Kyiv, Ukraine

10-12 March 2025

**Kyiv, Ukraine**

**2025**

**UDC 001.1**

The 2<sup>nd</sup> International scientific and practical conference “Global trends in science and education” (March 10-12, 2025) SPC “Sci-conf.com.ua”, Kyiv, Ukraine. 2025. 838 p.

**ISBN 978-966-8219-82-5**

The recommended citation for this publication is:

*Ivanov I. Analysis of the phaunistic composition of Ukraine // Global trends in science and education. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2025. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-global-trends-in-science-and-education-10-12-03-2025-kiyiv-ukrayina-arhiv/>.*

**Editor**

**Komarytskyy M.L.**

*Ph.D. in Economics, Associate Professor*

Collection of scientific articles published is the scientific and practical publication, which contains scientific articles of students, graduate students, Candidates and Doctors of Sciences, research workers and practitioners from Europe, Ukraine and from neighbouring countries and beyond. The articles contain the study, reflecting the processes and changes in the structure of modern science. The collection of scientific articles is for students, postgraduate students, doctoral candidates, teachers, researchers, practitioners and people interested in the trends of modern science development.

**e-mail:** [kyiv@sci-conf.com.ua](mailto:kyiv@sci-conf.com.ua)

**homepage:** <https://sci-conf.com.ua>

©2025 Scientific Publishing Center “Sci-conf.com.ua” ®

©2025 Authors of the articles

47.	<i>Кучерявий В. М., Гуйда О. Г.</i>	232
	КРИПТОГРАФІЯ ТА ЕЛЕКТРОННИЙ ПІДПИС У ДОКУМЕНТАЛЬНИХ КОМУНІКАЦІЯХ	
48.	<i>Мірошніченко Н. В., Козюк Н. І.</i>	236
	ЕКОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ КОКСОХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ШЛЯХИ ЙОГО МІНІМІЗАЦІЇ	
49.	<i>Павленко В. М., Солодей І. І.</i>	239
	ВИКОРИСТАННЯ НАПІВНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ЗАДАЧАХ ДЕФОРМУВАННЯ ГРУНТОВИХ ОСНОВ	
50.	<i>Поліщук Б. В., Мітіна Н. Б.</i>	246
	ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОСТІЙКИХ ПОЛІМЕРІВ В ЯКОСТІ АНТИФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	
51.	<i>Срібняк Н. М., Галушка С. А., Гонка В. С., Рябокони Ю. М.</i>	249
	ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ БУДІВЕЛЬНИХ СИСТЕМ НА ПРИКЛАДІ ДИСКА ПЕРЕКРИТТЯ ІЗ ЗБІРНИХ ПЛИТ	
52.	<i>Срібняк Н. М., Галушка С. А., Безсонов К. С., Андрушечко Ю. О.</i>	256
	ЕФЕКТИВНІ СТАЛІВІ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ПОКРИТТЯ БУДІВЕЛЬ	
53.	<i>Твердохліб А. О.</i>	263
	ВПЛИВ АЛГОРИТМІВ КОНСЕНСУСУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ	
54.	<i>Третенков В. М., Дорофєєв В. С., Зінченко Г. В., Капула О. С.</i>	269
	ШЛЯХИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ВИМІРЮВАННЯ	
55.	<i>Шарапова Т. А., Яцух О. В., Гажитов К. В.</i>	274
	ОРГАНІЗАЦІЯ ХІМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В ПРОМИСЛОВОСТІ	

#### PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

56.	<i>Vynohradska V. H.</i>	277
	CHAOS THEORY AND ITS IMPACT ON PREDICTABILITY IN PHYSICAL SYSTEMS	
57.	<i>Калайда О. Ф.</i>	281
	МНОГОЧЛЕНИ ТИПУ ЛАГРАНЖА З ВАГАМИ	

#### GEOGRAPHICAL SCIENCES

58.	<i>Старко М. В.</i>	283
	ВИКОРИСТАННЯ КІНЕТИКИ ОСАДЖЕННЯ ДОННИХ ВІДКЛАДЕНЬ ТА ПІДСТИЛАЮЧИХ ГРУНТІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ГІДРОТЕХНІЧНИХ РОБІТ НА ВОДНІ ЖИВІ РЕСУРСИ	

# ЕФЕКТИВНІ СТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ПОКРИТТЯ БУДІВЕЛЬ

**Срібняк Наталія Миколаївна,**

к.т.н., доцент

**Галушка Сергій Анатолійович,**

ст.викладач

**Безсонов Кирило Сергійович,**

**Андрущечко Юрій Олегович,**

Студенти

Сумський національний аграрний університет

м. Суми, Україна

**Вступ. / Introductions.** Великопролітні просторові конструкції для громадських, промислових, спортивних споруд, палаців спорту, торгових і логістичних комплексів, розважальних центрів та концертних майданчиків можуть бути реалізовані за допомогою наскрізних перехресних систем.

Використання легких перехресних ферм у покритті будівель є сучасним і ефективним рішенням. Просторова робота такої конструкції забезпечується зв'язками, розташованими у двох напрямках ферм, які передають зовнішні навантаження. Завдяки підвищенню жорсткості покриття зменшуються зусилля в окремих елементах, що дозволяє застосовувати тонкостінні сталеві профілі, знижуючи витрати сталі порівняно із суцільностінчастими прокатними балками.

Загальна стійкість конструкції забезпечується шляхом формування кількох просторових блоків уздовж периметра покриття. Легкі перехресні ферми, виконані з тонкостінних профілів, створюють жорсткий диск покриття завдяки закріпленню горизонтальними зв'язками в нижньому поясі та прогонами у верхньому. Це сприяє ефективній просторовій роботі конструкції.

**Мета роботи. / Aim.** Метою роботи є проведення числового експерименту для аналізу напружено-деформованого стану скінченоелементних моделей покриття, виконаних із гарячекатаних профілів й з легких сталевих тонкостінних профілів. Завдання включають визначення параметрів стійкості обох моделей, оцінку та аналіз їх деформованого стану під

локальним навантаженням. На основі отриманих результатів необхідно здійснити конструювання перерізів елементів скінченоелементних схем і провести оцінку матеріаломісткості запропонованих варіантів.

**Матеріали та методи./Materials and methods.** *Метод скінчених елементів* (МСЕ) є наближеним (апроксимаційним) методом у будівельній механіці, що застосовується для визначення зусиль, напружень та деформацій у скінчених елементах і вузлах розрахункової схеми. Він широко використовується для аналізу складних систем, як статично визначуваних, так і статично невизначуваних.

У межах МСЕ плоскі ферми покриття сталеві каркасної будівлі моделюються у вигляді розрахункових схем, що складаються зі стержньових скінчених елементів, з'єднаних між собою у вузлах. Кожен стержньовий елемент характеризується жорсткісними параметрами, такими як розміри поперечного перерізу, початковий модуль пружності сталі, питома вага матеріалу та коефіцієнт Пуассона.

Всі елементи скінченоелементної моделі зазнають спільних деформацій під дією навантаження. Ступінь їхньої взаємодії залежить як від конструктивного рішення системи, так і від рівня її зв'язності.

*Методика підбору перетинів сталевих стержньових елементів* ґрунтується на положеннях чинних нормативних документів з проектування сталевих конструкцій [1]. Визначення перетинів стержнів ферм та зв'язевих елементів повинно здійснюватися відповідно до вимог і рекомендацій нормативних стандартів з проектування металевих конструкцій.

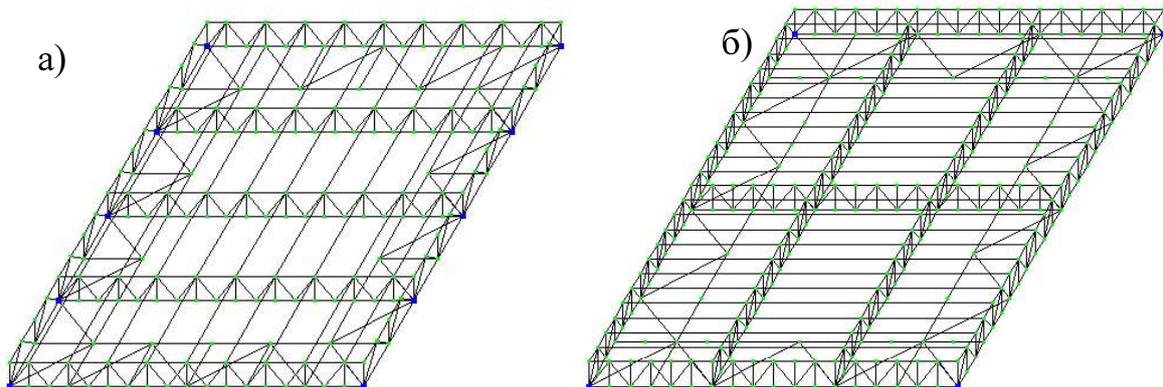
**Результати та обговорення./Results and discussion.** Розглянуто скінченоелементні розрахункові схеми можливих конструктивних рішень покриття промислової будівлі розміром в плані 18,0×24,0 м.

Перша модель являє собою традиційне рішення покриття, що складається з кроквяних ферм Ф-1 з прольотом 18,0 м. У торцевих частинах перекриття (18,0×24,0 м) розташовані зв'язкові ферми Ф-2 завдовжки 6,0 м. Жорсткість забезпечується горизонтальними зв'язками, що проходять по нижніх поясах

ферм Ф-1 і Ф-2 (рис.1, а).

Друга модель представляє більш ефективне покриття, виконане з легких тонкостінних сталевих профілів (ЛСТК), що мають відкриту форму та виготовляються методом холодного формування. Товщина стінки таких профілів зазвичай становить від 1,5 до 4 мм. Конструкція покриття (рис.1, б) базується на використанні легких перехресних ферм, які утворюють жорсткі прямокутні замкнені блоки розміром 6×12 м. Загальна стійкість конструкції забезпечується створенням просторових блоків по периметру покриття.

Основна концепція цієї конструкції полягає в тому, що ферми ЛСТК, закріплені по нижньому поясу горизонтальними зв'язками, а по верхньому – прогонами, формують жорсткий диск покриття. Така схема значно підвищує просторову жорсткість каркаса будівлі. Для елементів ферм застосовуються тонкостінні профілі типу [та].



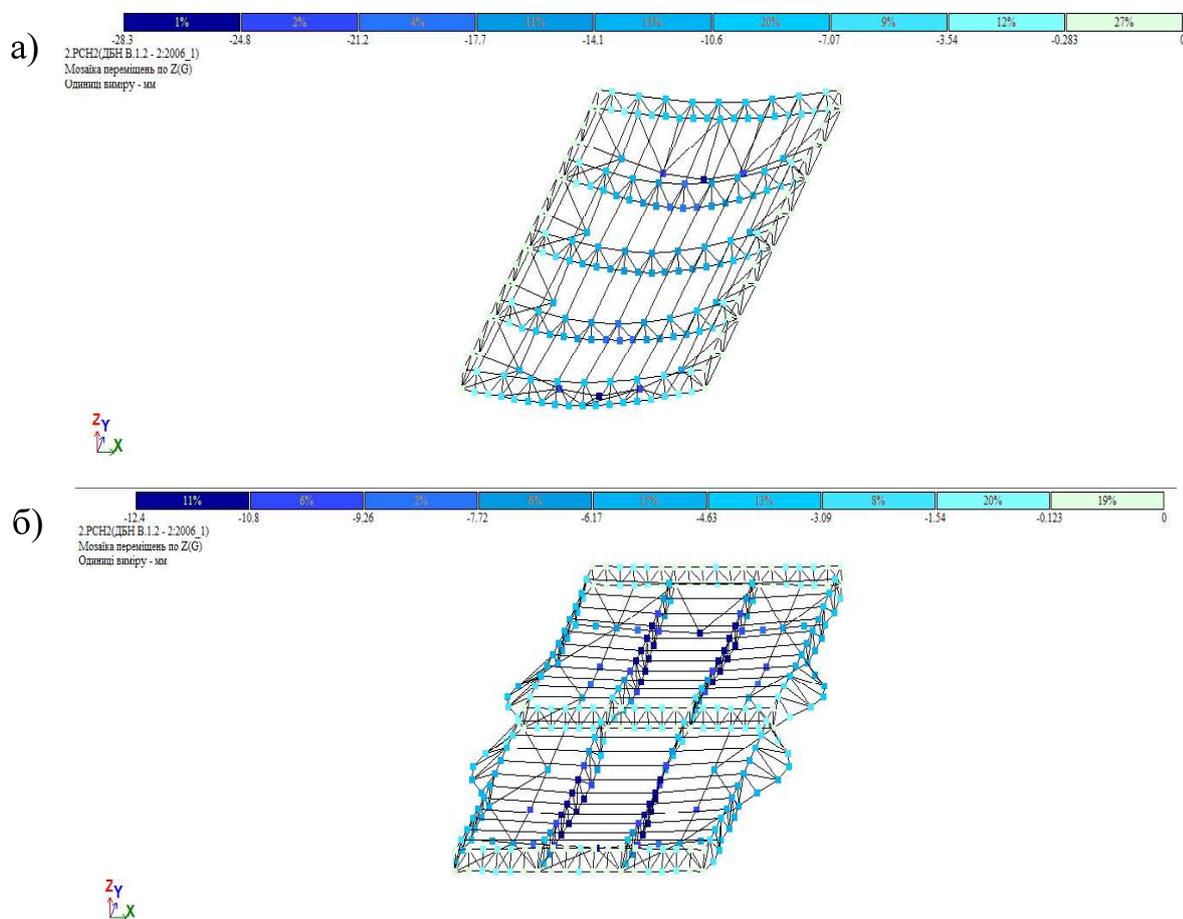
**Рис. 1. Розрахункові СЕ моделі, що прийняті для розрахунку: скінченоелементна схема покриття 18х24 м із виконана із гарячекатаних сталевих профілів (модель №1) -а; скінченоелементна схема покриття із ферм з ЛСТК формують жорсткий диск покриття (модель №2)-б**

Для автоматизації підбору перерізів у модулі «Метал» кожному елементу розрахункових схем було задано конструктивні параметри відповідно до нормативних вимог проектування. При розрахунку покриття враховуються основні навантаження, зокрема власна вага стержньової конструкції, елементи покрівлі та снігове навантаження.

Для моделі № 1 прийнято поперечні перерізи стержнів конструкції

покриття із гарячекатаних профілів для всіх конструктивних груп стержнів (верхній пояс, нижній пояс, решітка) прийняті профілі із двох спарених кутників за ГОСТ 8510-72. Для моделі № 2 для елементів ферм, що об'єднані в замкнені жорсткі диски, прийнято легкі холодногнуті сталеві профілі типу [[ за сортаментом «Акfabuid» (СТО 02494680-073-2020).

Аналіз результатів розрахунків, виконаних у модулі ЛІР-Візор, дозволяє визначити оптимальну модель серед двох досліджуваних, орієнтуючись на значення осьових зусиль  $N$  та максимальних вертикальних деформацій конструкції  $f_z$ . На рис. 2 наведено мозаїку вертикальних переміщень вузлів від РСН2 для двох СЕ моделей, що досліджуються.



**Рис. 2. Мозаїка переміщень вузлів  $f_z$  від РСН 2 для : схеми №1 -а;  
схеми №2-б**

В таблицях 1-2 наведено максимальні поздовжні зусилля  $N$  від РСН2 для стержньових елементів моделей конструкцій покриття.

**Максимальні зусилля N (т) в стержнях ферм Ф-1  
скінченоелементних моделей**

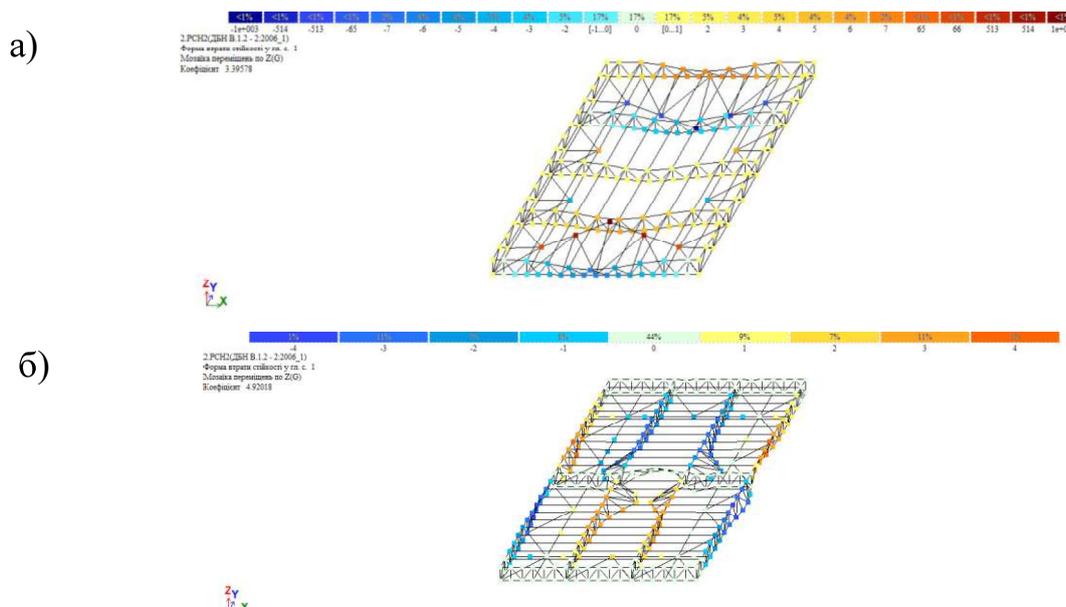
Назва конструктивної групи елементів	Схема№1		Схема№2	
Верхній пояс	-45,3	0	-12,5	13,08
Нижній пояс	-21,3	15,2	-13,2	6,91
Решітка	-15,3	12,3	-9,7	9,02

Таблиця 2

**Максимальні зусилля N (т) в стержнях ферм Ф-2  
скінченоелементних моделей**

Назва конструктивної групи елементів	Схема№1		Схема№2	
Верхній пояс	-0,509	0,212	-0,991	0,491
Нижній пояс	-0,09	0,09	-0,484	0,371
Решітка	-0,589	0,299	-1,47	0,723

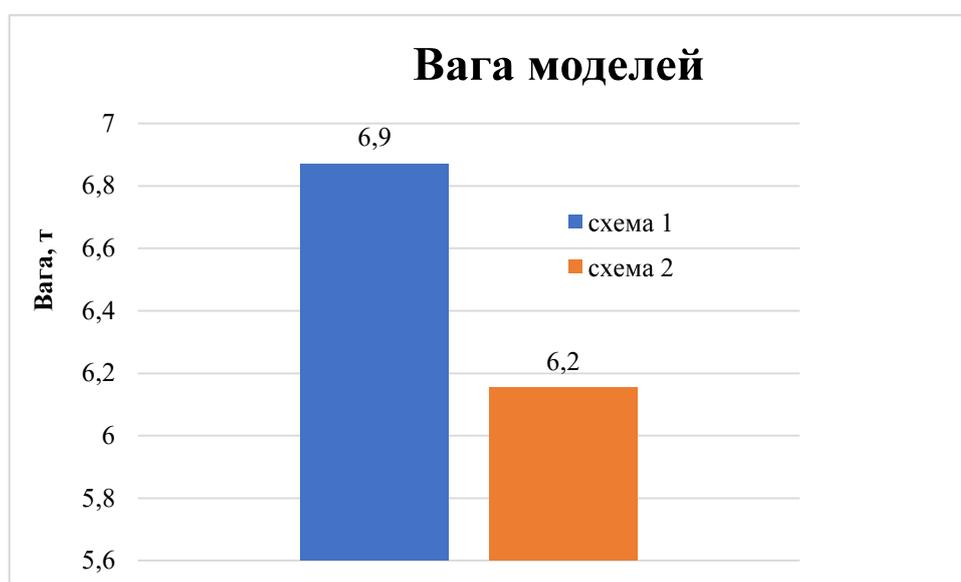
Коефіцієнт стійкості характеризує здатність системи протистояти зовнішнім впливам або змінам умов. Його значення може бути як додатним, так і від'ємним; при від'ємному значенні система вважається нестійкою і потребує детальнішого статичного аналізу та коригування конструктивних рішень. Ціла частина коефіцієнта показує, у скільки разів можна збільшити навантаження на систему до втрати її стійкості. На рис. 3 представлені форми втрати стійкості для обох моделей від розрахункового сполучення навантажень № 2.



**Рис. 3. Форма втрати стійкості від РСН2: схеми №1 (n= 3,4) -а; схеми №2 (n=4,92) -б**

Було проведено аналіз ступеня використання несучої здатності перетину трубчастих стержнів на основі результатів першого ітераційного розрахунку. Встановлено, що найбільший відсоток використання площі перетину несучих елементів спостерігається в елементах моделі № 2.

Після першого ітераційного розрахунку в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР були підібрані нові перерізи конструкцій покриття й підраховано вагу моделей, що досліджуються. Загальна вага моделей покриття, які досліджуються, становить для схеми № 1- 6,9 т, а для моделі № 2-6,1 т (див. рис. 4). Різниця у вазі моделей становить 11,9%.



**Рис. 4. Загальна вага моделей, що розраховуються**

### **Висновки./Conclusions**

1. Максимальні переміщення  $f_z$  вузлів скінченоелементної схеми для моделі №2 (із ЛСТК) від РСН2 на 128% (або в 2,3 рази) менші, ніж у моделі №1. Це свідчить про вищу жорсткість і значно меншу деформативність покриття в моделі №2, де застосовано принцип просторових замкнутих жорстких блоків.

2. Максимальні осьові зусилля стиску в елементах верхнього поясу для моделі №1 складають 45,3 т, а для моделі №2 — 12,5 т, що в 3,5 рази менше. Це свідчить про більш ефективну роботу елементів моделі №2 на стиснення.

3. Розрахунок на стійкість показав, що модель №2 на 1,45 рази більш

стійка, ніж модель №1 без замкнутих жорстких контурів. Вага моделі №2 на 11,2% менша, ніж у моделі №1. Встановлено, що завантаження, прикладене до будь-якої точки покриття за моделлю №2 (із замкнутими жорсткими блоками ЛСТК), викликає спротив, що означає, що всі елементи конструкції працюють разом.

4. Отже, проаналізувавши параметри напружено-деформованого стану двох скінченоелементних моделей, їх стійкість, роботу під локальним завантаженням, вагу моделей. можна дійти висновку, що з точки зору матеріалоемності та ефективності статичної роботи є модель №2, що змонтована із легких сталевих холодногнутих профілів.

#### **ЛІТЕРАТУРА.**

1. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. К.: Мінрегіон України, 2014. 15 с. (Національний стандарт України).
2. ДБН В.1.2-2:2006 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування»
3. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини та переміщення