

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

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
Будівельних конструкцій

/...../

підпис

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

**На тему: «Напружено-деформований стан гіперболічної оболонки
покриття»**

Виконав (ла)

(підпис)

Макаров Ю.Ю.

(Прізвище, ініціали)

Група

(Науковий)

керівник

(підпис)

ПЦБ 2202 м

Срібняк Н.М.

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2024 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: будівельних конструкцій

Спеціальність: 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Макаров Юрій Юрійович

Тема роботи: Напружено-деформований стан гіперболічної
оболонки покриття

Затверджено наказом по університету № 536/ос від "21" 02 2024р.
Строк здачі студентом закінченої роботи: "___" _____ 2024 р.

Вихідні дані до роботи:

Геометричні моделі та конструктивні рішення моделей гіперів-
оболонок різних типів.

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

Дослідити формоутворення та особливості роботи поверхонь типу гіперболічний параболоїд. Прийняти для дослідження в рамках числового експерименту чотири моделі тонкостінної оболонки покриття типу гіпар (типу «гриб» та типу «шатер»). Змодельовати чотири СЕ моделі гіперболічних оболонок, виконати статичний розрахунок моделей, виконати аналіз результатів та 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.В. Душин

(Прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання:

Здобувач

(підпис)

Ю.Ю. Макаров

(Прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Макаров Юрій Юрійович. Напружено-деформований стан гіперболічної оболонки покриття – Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

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

Робота складається із змісту, загальної характеристики роботи та її кваліфікаційних ознак, опису об'ємно-планувального та конструктивного рішення будівлі, огляду досліджень за обраною темою, розділів основної частини, висновків за результатами досліджень та формулювань перспектив досліджень (українською та англійською мовами).

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

Аналіз публікацій та досліджень включає огляд архітектурно-конструктивних вирішень оболонок гіпарів, розглянуто методику розрахунку пологих гіпарів з прямолінійними краями (як окремих оболонок, так і складених систем) за безмоментною та моментною теоріями. На основі розрахунків досліджена специфіка напруженого стану цих оболонок та надані конкретні рекомендації щодо проектування тонкостінних гіперболічних оболонок. Наводяться таблиці для розрахунку систем, що складаються з чотирьох оболонок на квадратному плані.

В основній частині наведено опис конструктивного вирішення чотирьох моделей гіперболічних скомпонованих оболонок на квадратному плані, виконано перевірку стійкості цих поверхонь, виходячи з кривини їх поверхонь та діючого на них навантаження; виконано армування поля оболонки за величинами

максимальних головних напружень розтягу.

У **висновках** проаналізовано результати статичного розрахунку різних моделей, визначено найбільш ефективну модель гіперболічної поверхні з точки зору статичної роботи .

Практичне значення отриманих результатів дозволяє визначити найбільш ефективну поверхню з точки зору її статичної роботи із декількох можливих поверхонь, що мають однакові геометричні розміри в плані та по висоті та відрізняються лише формоутворенням. В якості формоутворюючих поверхонь прийняті поверхні подвійної Гаусової кривини гіперболічного типу. Критерій ефективності за НДС досліджувався від зміни одного виду гіперболічної поверхні, способу її компоновки (розташування) на квадратному плані. Прийнято до розгляду складені поверхні типу «гриб» та типу «шатер». Проаналізовано теоретичні та експериментальні дослідження поверхні типу гіпар.

Ключові слова: тонкостінна оболонка, гіперболічний параболоїд, головні напруження, поверхня, що не розгортається, Гаусова кривина, стріла підйому

Список публікацій та/або виступів на конференціях студента:

Макаров Ю.Ю., Сирота М.М., Срібняк Н.М. Напружено-деформований стан циліндричної оболонки в залежності від стріли підйому // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (13-17 листопада 2023 р.) – Суми, 2023. С. 95

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

Структура роботи. Робота складається з основного тексту на 59 сторінках, у тому числі 8 таблиць, 41 рисунка. Текст роботи містить 7 розділів, що включають загальну характеристику роботи й висновки, список з 23 джерел, 2 додатків на 49 сторінках. Графічна частина складається з 45 слайдів мультимедійної презентації.

Abstract

Makarov Yurii Yuriiovich. The stress-strain state of the hyperbolic shell of the coating – Master's qualification work with manuscript rights.

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

The work consists of the content, the general characteristics of the work and its qualification features, a description of the volume-planning and constructive solution of the building, an overview of research on the chosen topic, sections of the main part, conclusions based on the results of research and formulations of research perspectives (in Ukrainian and English).

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

The analysis of publications and research includes an overview of architectural and constructive solutions of the shells of hypars, the method of analysis of gentle hypars with rectilinear edges (both individual shells and composite systems) according to momentless and moment theories is considered. Based on the analyses, the specifics of the stress state of these shells were investigated and specific recommendations for the design of thin-walled hyperbolic shells were provided. Tables are provided for analyzing systems consisting of four shells on a square plan.

In the **main part**, a description of the constructive solution of four models of hyperbolic composite shells on a square plan is given, a check of the stability of these surfaces is performed, based on the curvature of their surfaces and the load acting on them;

reinforcement of the shell field was carried out according to the values of the maximum principal tensile stresses.

In the **conclusions**, the results of the static analysis of various models are analyzed, the most effective model of the hyperbolic surface from the point of view of static work is determined.

The **practical value** of the obtained results allows to determine the most effective surface from the point of view of its static work from several possible surfaces that have the same geometric dimensions in plan and height and differ only in shaping. Surfaces of double Gaussian curvature of the hyperbolic type are used as form-forming surfaces. The efficiency criterion for the stressed-strained state was studied from the change of one type of hyperbolic surface, the way of its arrangement (location) on a square plan. Folded surfaces of the "mushroom" and "tent" types are considered. Theoretical and experimental studies of the surface of the hypar type have been analyzed.

Key words: thin-walled shell, hyperbolic paraboloid, principal stresses, non-unfolding surface, Gaussian curvature, lift boom

A list of the student's publications and/or speeches at conferences:

Makarov Yu.Iu., Syrota M.M., Sribniak N.M. The stress-deformed state of the cylindrical shell depending on the lifting boom // Materials of the All-Ukrainian scientific conference of students and postgraduates dedicated to the International Student Day (November 13-17, 2023) - Sumy, 2023. P. 95

In the **appendices** are given; abstracts of the conference, an album of multimedia presentation slides.

Structure of work. The work consists of the main text on 59 pages, including 8 tables, 41 figures. The text of the work contains 7 chapters, including a general description of the work and conclusions, a list of 23 sources, 2 appendices on 49 pages. The graphic part consists of 45 slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

Завдання.....	
Анотація.....	
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА	
РОБОТИ.....	
1.1 Актуальність теми.....	
1.2 Мета, задачі, об'єкт й предмет дослідження. Методи наукового дослідження, що прийнято.....	
РОЗДІЛ 2. БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ.....	
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	
РОЗДІЛ 2. ГІПЕРБОЛІЧНІ ПОВЕРХНІ	
4.1 Загальні відомості щодо гіперболічних поверхонь.....	
4.2 Скінченоелементні моделі оболонок.....	
4.3 Відомості щодо складених в плані гіперболічних оболонок.....	
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ ГІПЕРБОЛІЧНИХ ОБОЛОНОК	
5.1 Моделі поверхонь, що досліджуються.....	
5.2 Геометрія поверхонь та їх конструктивне вирішення.....	
5.2.1 Конструктивне вирішення оболонок за схемами №1 та №2 та перевірка їх стійкості.....	
5.2.1.1 Перевірка стійкості оболонок типу «гриб».....	
5.2.2 Конструктивне вирішення оболонок за схемами №3 та № 4 та перевірка їх стійкості.....	
5.2.2.1 Перевірка стійкості оболонок типу «шатер».....	
5.3 Матеріал для оболонок.....	
5.4 Жорсткісні характеристики елементів схем.....	
5.5 Навантаження на оболонки.....	
РОЗДІЛ 6. РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОБОЛОНОК.....	
6.1 Головні напруження в тонкостінній оболонці.....	

6.2 Підбір армування поля оболонки.....	
6.3 Деформативність оболонок.....	
РОЗДІЛ 7. ВИСНОВКИ.....	
ЛІТЕРАТУРА.....	
Додатки.....	
Додаток 1.Тези доповіді на конференції.....	
Додаток 2.Графічний матеріал (презентація).....	

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

1.1 Актуальність теми

У будівельній практиці впродовж значного часового періоду використовували в практиці проектування прості моделі, взяті з геометрії: паралелепіпеди, піраміди, призми, сфери конуси. Розвиток науки й культури, збільшення практичного досвіду є ґрунтом для досягнень при проектуванні та зведенні різноманітних будівель та споруд, що мають громадське та промислове призначення. Ці здобутки знаходять відображення в архітектурно-конструктивних образах споруд та будівель, у матеріалах, які застосовуються при зведенні будівель та споруд, зокрема і унікальних. З розвитком програмних обчислювальних комплексів для розрахунку будівельних матеріалів, з удосконаленням фізико-механічних характеристик матеріалів, додавання в них різноманітних домішок виявилася можливість в архітектурно-будівельній практиці застосовувати складні криволінійні форми другого й вищих порядків. Нині математичне моделювання поверхонь покриттів та об'ємів дозволяє створювати такі поверхні складної криволінійної форми, які не можливо описати формульно. Але цю задачу виконує математичне моделювання.

Застосування нових, складних математичних моделей поверхонь, окреслило нагальне питання зв'язку між параметрами геометричної моделі та її несучої здатності [1].

Останнім часом ураховуючи розвиток та активне упровадження ВІМ-технологій до практики проектування, з'явилися принципово нові можливості у застосуванні просторових конструкцій під час проектування будівель та споруд. Сучасні системи проектування та програми скінченоелементного аналізу (AutoCAD, ArchiCAD, Компас, Ліра-САПР, ANSYS, MicroFe та інші) додають можливість побудувати модель конструкції, яка проектується, здійснити її статичний аналіз, конструктивний розрахунок та розробити проектну документацію [1].

Архітектурно виразними та актуальними в останній час є конструкції покриття у вигляді оболонок. Серед переваг оболонок-покриттів є можливість перекриття значного польоту без улаштування проміжних опор, можливість поєднання функції огороження та несучої функції.

Для проектувальника важливим завданням є пошук геометричної форми, яка найкращим чином відповідає вимогам, що задані проектувальником наперед. Видатний італійський інженер П'єр Луїджі, якого вважали «поетом залізобетону» вважав, що «несуча здатність конструкції являє собою функцією її геометричної форми». Ефективна та раціональна статична робота тонкостінної залізобетонної чи армоцементної оболонки з криволінійною поверхнею другого порядку досягається оптимізацією форми поверхні й це є складною інженерною задачею [2].

Форма оболонки вирішальним чином впливає на її напружений стан. Напружено-деформований стан оболонки суттєво залежить від гаусової кривини поверхні й з лінійчатістю оболонки, що пов'язана із кривизною. Усі поверхні в геометрії можна розділити на три типи поверхонь: із параболічними, гіперболічними й еліптичними точками [2].

Оболонки, що мають циліндричну чи конічними поверхню гірше чинять опір моментам вигину. В цьому разі небезпека прогину є великою. Конструкції оболонок необхідно належним чином закріпити та заармувати та влаштувати підсилення з діафрагмам.

Оболонки типу гіпар, однопорожнинний гіперболічний параболоїд, частина тора, коноїд та ін. краще чинять опір згинальним моментам. [2].

1.2 Мета, задачі, об'єкт й предмет дослідження. Методи наукового дослідження, що прийнято

Метою роботи є дослідження напружено-деформованого стану декількох моделей тонкостінних залізобетонних оболонок, що являють собою з'єднані на квадратному плані гіперболічні поверхні. Геометричні параметри оболонок (товщина, розміри в плані, стріла підйому) є однаковими. Різниця полягає лише у способі компонування окремих фрагментів гіперболічної

поверхні на квадратному плані. Від формоутворення (способу компоновання) і залежить напружено-деформований стан оболонки.

Задачі, які були поставлені для досягнення мети:

- аналіз принципів статичної роботи гіпару зважаючи на його формоутворення;
- створення за методом скінчених елементів чотирьох розрахункових моделей складених гіпарболічних параболоїдів, що утворюють поверхні за формою «гриб» та «шатер»;
- виконання статичного розрахунку в ПК ЛІРА-САПР обраних чотирьох варіантів конструкцій;
- аналіз даних статичних розрахунків й обрання найбільш ефективної моделі гіпарів.

Об'єкт дослідження – тонкостінні залізобетонні складені з однакових фрагментів на квадратному плані гіперболічні оболонки.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан тонкостінних залізобетонних складених з однакових фрагментів на квадратному плані, гіперболічних оболонках.

Практичне значення отриманих результатів

Результати досліджень дозволяють визначити з декількох можливих форм тонкостінних залізобетонних гіперболічних оболонок більш раціональну з точки зору статичної роботи поверхню.

Апробація та публікація результатів роботи

Результати роботи опубліковано в збірнику тез студентсько-викладацької щорічної конференції Сумського національного аграрного університету.

Макаров Ю.Ю., Спрота М.М., Срібняк Н.М. Напружено-деформований стан циліндричної оболонки в залежності стріли підйому // *Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (13-17 листопада 2023 р.)* – Суми, 2023.

РОЗДІЛ 2

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

Графічні вбудовані редактори Mathematica, Maple, Matlab, Mathcad систем компютерної математики дає можливість за рівняннями типу $F(x, y, z) = 0, z = f(x, y)$ або $r \rho = r \rho(u, v)$ одержати незлічену множину поверхонь, які теоретично можна використовувати для формоутворення певної просторової конструкції. Форма поверхні конструкції повинна надавати можливість виконувати стикування або зчленування з іншими конструкціями чи їх окремими елементами, виконати привязку цієї конструкції до плану.

Аналітичні поверхні знаходять широке застосування в різних галузях техніки, а також й в будівництві. Традиційно для проектування криволінійних поверхонь в будівництві використовується досить обмежене коло поверхонь, що запозичені з форм Евклідової геометрії: циліндричні, сферичні, конічні, пологі трансляційні поверхні й деякі поверхні обертання. Сучасній архітектурі притаманні до незвичних, оригінальних форм. Отже, з'являється потреба в нових методах моделювання поверхонь, що можуть бути використані при проектуванні просторових конструкцій, зокрема просторових конструкцій покриття.

Розв'язання задач розрахунку та конструювання поверхонь є однією із основних задач інженерної геометрії. Задачі геометричного моделювання висвітлені в роботах-дослідженнях поверхонь гіпарів М. Мілейковського.

Поверхні типу гіперболічний параболоїд досліджував також математик із Бельгії Ежен-Шарль Каталан.

Інші поверхні з точки зору геометричного моделювання висвітлено в роботах А.Ш. Готмана, А.В. Зам'ятіна, С.Н. Кривошاپко, В.Н. Іванова, А.В. Крутова, М.М. Голованова, А.Г. Трущева, В.Г. Рекача, А.Л. Хейфеца, О.В. Мискова, В.А. Лебедева, Є.В. Попова та інших.

Формоутворенню та способам конструювання присвячені роботи німецького інженера Г. Рюле [5].

Дослідженням поведінки складчатих оболонок із вуглецевотекстильного залізобетону на основі оргіамі досліджувалися Хомамом Спарталі та Йозефом Хеггером [6].

Приклади поверхонь покриттів у вигляді гіперболічного параболоїду наведено на рис.2.1



Рис.2.1 Приклади гіперболічних поверхонь

Впродовд багатьох десятиліть в різних країнах світу було накопичено значний досвід у щодо втілення в різних архітектурних формах найпростіших поверхонь- циліндру, сфери, конусу, різноманітних поверхонь обертання.

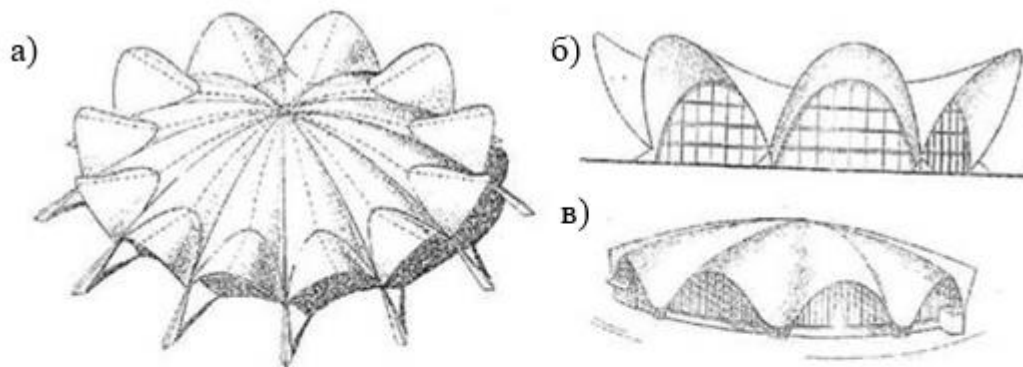


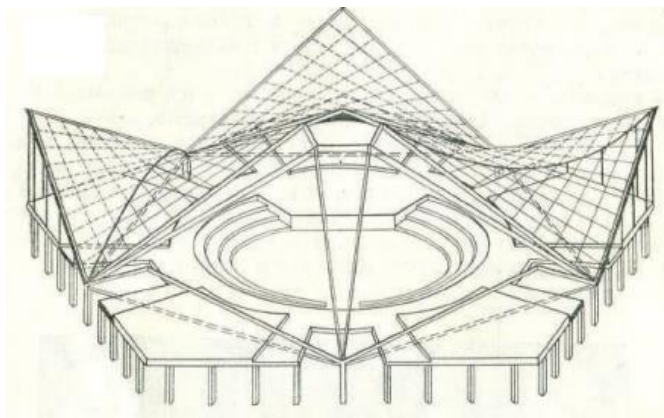
Рис.2.2 Тонкостінні просторові конструкції: а – купол зі склопластику у вигляді секторів гіперболічних поверхонь; б – покриття із залізобетонного гіпару; в – 13-пелюстковий хвилястий залізобетонний купол ринку в Руайяне Франція

Автори-дослідники І.Є. Мілейковський та А. К. Купар в своїй роботі виконали огляд архітектурно-конструктивних рішень тонкостінних оболонок типу гіпар. В цих роботах розглянуто також методологію розрахунку гіпарболічних параболоїдів з прямолінійним краями, що можна вважати пологими. Було розглянуто в рамках безмоментно й моментної теорій як окремі оболонки, так й складені системи. В роботі І.Є. Мілейковського та А.

К. Купара досліджено специфіку напружено-деформованого стану цих оболонок й запропоновано рекомендації стосовно проектування тонкостінних гіперболічних оболонок. Також в дослідженні наведено таблиці для виконання розрахунку систем, які утворено із чотирьох оболонок, розташованих поряд на квадратному плані.

В роботі цих авторів вказано, що в будівлях громадського призначення ефективним є використання конструкцій покриттів центричних композицій у вигляді групи із трьох, чотирьох чи п'яти гіперболічних складених в поані оболонок. Перевагою таких композицій порівняно з рештою є в тому, що є можливість природного освітлення центральної частини простору, який перекривається. Природне освітлення здійснюється через ліхтарі симетричних й оригінальних форм, що надають неповторності та архітектурної виразності всій будівлі. Прикладом такої центричної композиції, що складається із п'яти гіперболічних оболонок є покриття актової зали жіночої гімназії в мсті Саутворк у Великій Британії (рис.2.3).

а)



б)

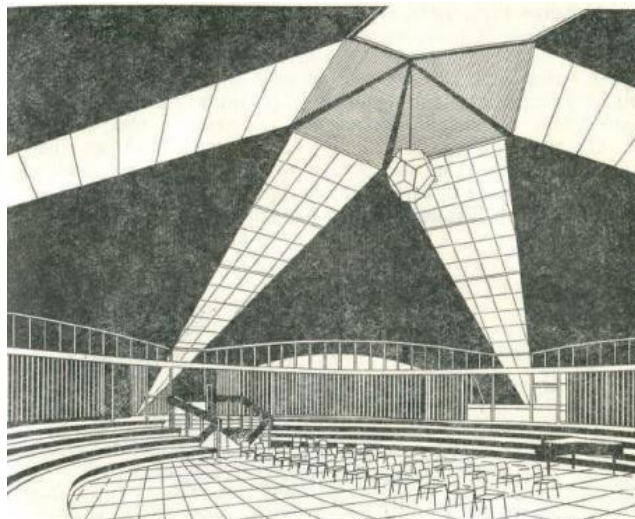


Рис.2.3 Актова зала гімназії в Саутворку (Англія): схема покриття –а;
інтер'єр зали – б

На рис. 2.4 зображено оболонки покриття у вигляді поєднання трьох-, чотирьох- та більше елементних центричних композицій. За характером спирання на опори (за граничними умовами) виокремлюють оболонки двох видів: із коньковим спиранням в кутах, які вільно звисають, й з спиранням в кутах.

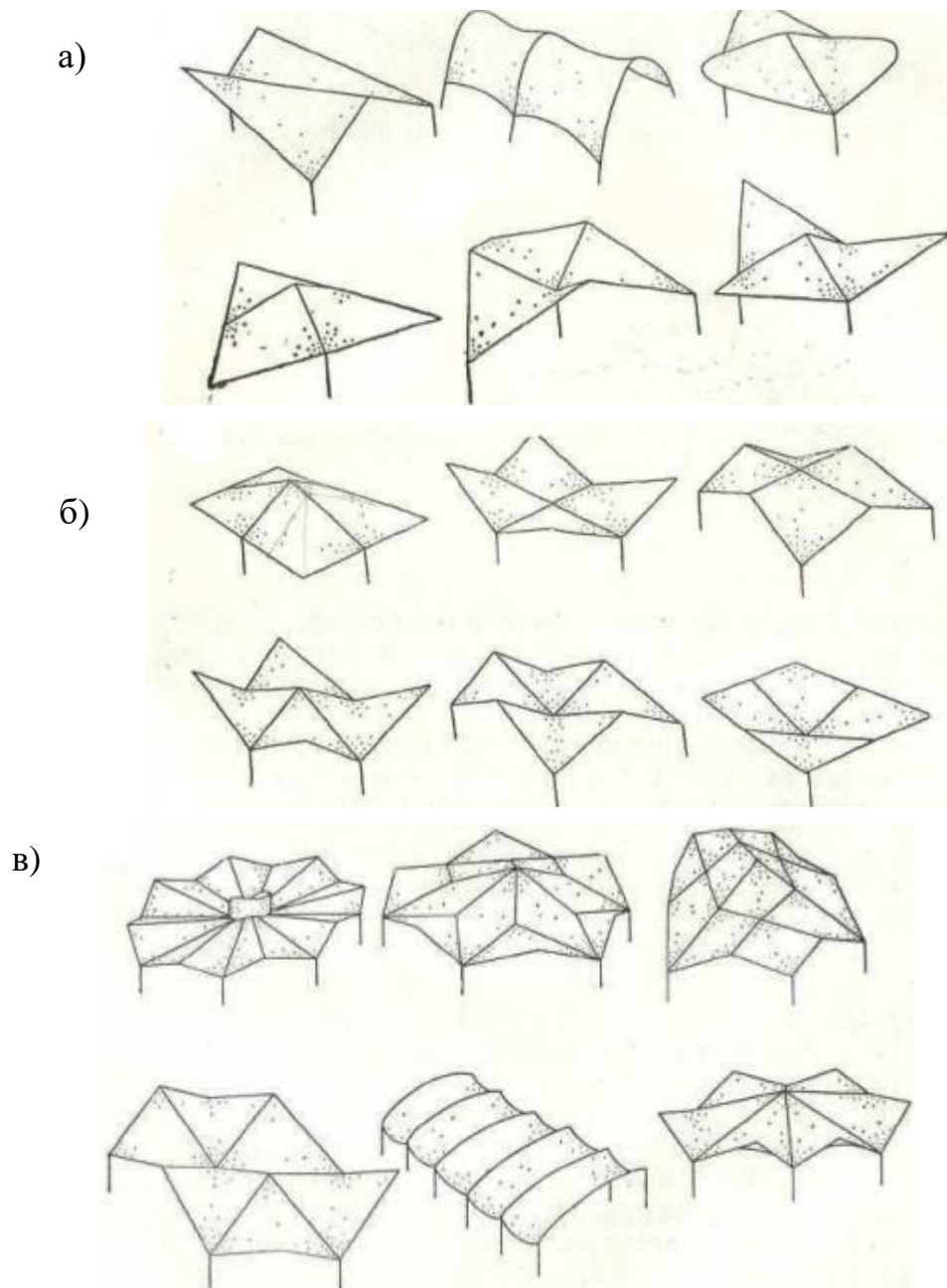


Рис. 2.4 Схеми покриттів у вигляді поєднання елементів: поєднання з двох-трьох елементів – а; поєднання з чотирьох елементів – б; поєднання з п-елементів – в

Поверхня гіпару на сьогодні вивчена достатньо, що надає можливість врахувати геометричні властивості таких поверхонь перед початком проектування. Із впровадженням в практичну будівельну сферу тонкостінних оболонок прості доволі легко можна втілити в життя. Однак такі поверхні не мали змоги задовольнити вимогам, які висувалися щодо конструкцій оболонки та їх форми. Для усунення проблеми дослідники-проектвальники звернули увагу до більш складних поверхонь другого порядку, й зокрема на такі форми як гіперболічний параболоїд й однопорожнинний гіперболічний параболоїд, сферична поверхня обертання, еліптичний параболоїд, та інші.

Якщо математик запропонує архітектору форму складної поверхні, то архітектор, може виокремити на ній велику кількість зон, які обмежено контурами різних типів – як прямолінійних, так і криволінійних. Ці контури можна розташувати таким чином, що вони сформуують нові цікаві архітектурні форми.

Форми поверхонь покриття другого порядку забезпечують гарне водовідведення, не сприяють утворенню снігових мішків. Несуча здатність оболонки й її акустичні властивості залежить від її форми. При вирішенні освітлення слід приймати до уваги факт, що поверхня конструкції розподіляє світло, що відлунюється.

Форма оболонки також обумовлює її аеродинамічні властивості. Статичними розрахунками та конструюванням тонкостінних залізобетонних циліндричних оболонок займалися Gulzar H. Barbhuiya, Syed Danish Hasan [11].

Дослідження роботи оболонок різних типів наведено в роботах [7,8,9]. Shimoda M., Iwasa K. займалися пошуком оптимальної форми оболонок [10].

Дослідження оболонок із інноваційного матеріалу – текстильно-армованого бетону наведено в [11]. В [11] обговорюються питання практичного характеру щодо виготовлення та зведення оболонок з текстильно-армованого бетону із використанням торкрет-бетону. В роботі запропонована концепція улаштування текстильної арматури та монтажу оболонок поверх

збірних залізобетонних колон. Дослідження великопрольної конструкції гіпару наведено в [14].

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Серед методів досліджень, що застосовано в роботі слід вказати наступні.

- 1. Метод пошуку, узагальнення та аналізу інформації.** Цим методом було проаналізовано інформацію із інтернет-джерел, публікацій, монографій як вітчизняних, так і закордонних авторів. Сформульовано висновки, описано особливості роботи під навантаженням оболонок типу гіпар, означено основні положення щодо конструювання оболонок такого типу.
- 2. Метод скінчених елементів.** Цей метод будівельної механіки застосовано для створення скінченоелементних схем оболонок типу гіперболічний параболоїд за різними їх можливими моделями – гіпар типу «гриб», гіпар типу «шатер». Так, для моделювання поля плити було прийнято скінчений елемент типу пластина. Для моделювання елементів колон, елементів плоских діафрагм жорсткості було прийнято скінчений елемент №10-просторовий стержень загального виду. Метод застосовано також для виконання статичних розрахунків цих моделей в лінійній постановці для визначення параметрів їх напружено-деформованого стану.
- 3. Модуль «Залізобетон»** в ПК «Ліра-САПР 2024» для підбору арматури згідно норм [2].
- 4. Аналітична методика** для розрахунку та перевірки стійкості оболонок усіх типів, що досліджуються.
- 5. Метод аналізу результатів розрахунку.** Використовується ПК Excel для опрацювання масиву даних, що є результатами статичних розрахунків моделей оболонок типу гіпар.

РОЗДІЛ 4

ГІПЕРБОЛІЧНІ ПОВЕРХНІ

4.1 Загальні відомості щодо гіперболічних поверхонь

Гіперболічним параболоїдом називають поверхню, яку можна описати в певній прямокутній системі координат $Oxyz$ канонічним рівнянням

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 2 \cdot z \quad (4.1)$$

В рівнянні (4.1) a і b – параметри, які є додатніми величинами, й є такими, що характеризують гіперболічні параболоїди.

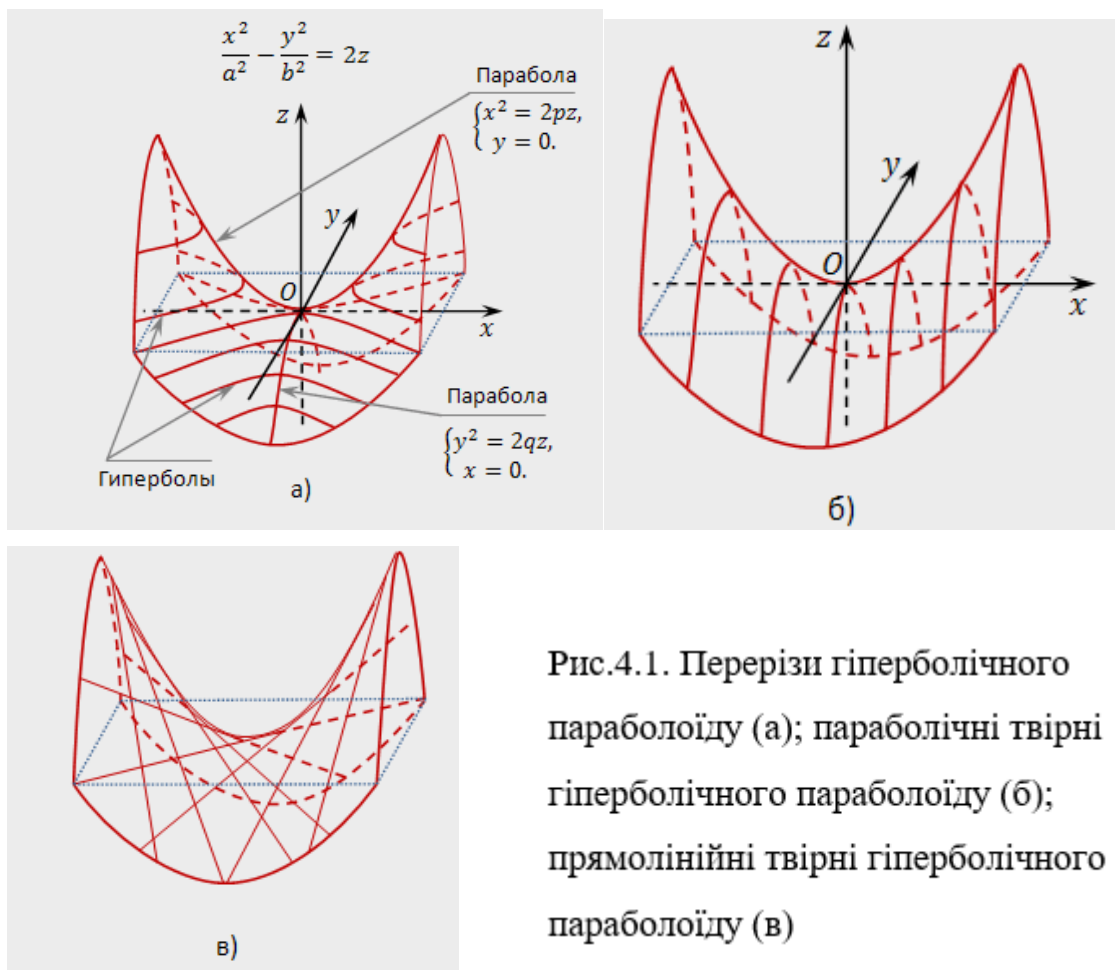


Рис.4.1. Перерізи гіперболічного параболоїду (а); параболічні твірні гіперболічного параболоїду (б); прямолінійні твірні гіперболічного параболоїду (в)

Гіпар (скорочено від «гіперболічний параболоїд») являє собою оболонку, середина поверхні котрої має подвійну Гаусову кривину. Кривина є різнознаковою. Центри кривини гіпару знаходяться по різні боки від поверхні. Тому, як наслідок, добуток кривин є від'ємним числом: $1/R_1 \cdot 1/R_2 < 0$. Таким чином, гіпар також характеризують як поверхню від'ємної Гаусової кривини. За Ф. Ємоном такі поверхні також називають антикластичними на

відміну від сінкластичних поверхонь, якими є поверхні додатної Гаусової кривини, (сферична форма, еліптичний параболоїд). Гіпар, будучи поверхнею подвійної кривини, **є такою поверхнею, що не розгортається** [13].

Для оболонки, які зводяться за технологією монолітного залізобетона, найбільш зручними є геометричні форми що характеризуються прямолінійними твірними. Серед таких форм виокремлюють два типи поверхонь, які утворені двома класами прямих: це гіперболічний параболоїд (гіпар), що має форму сідла й гіперболоїд обертаня. Площини, які торкаються цих поверхонь (є дотичними), є різними у різних точках твірної; Гіперболічні поверхні є поверхнями, які не розгортаються або, інакше – косими лінійчатими поверхнями.

Поверхня оболонки за гіперболічною формою утворюється переміщенням (трансляцією) прямої AB (твірної), яка є паралельною площині XOZ , уздовж двох прямих BC та AD , що не є паралельними та не перетинаються (рис.4.2). Перетин цієї поверхні площиною $OZAC$ є парабола, яка обернена випуклістю вгору. Перетин цієї поверхні площиною $OZBD$ є парабола, яка обернена опуклістю униз. Будь-яка площина, яка паралельна площині OXY , в перетині з поверхнею є гіперболою. Отже, гіпар, таким чином, являє собою коноїд особливого виду.

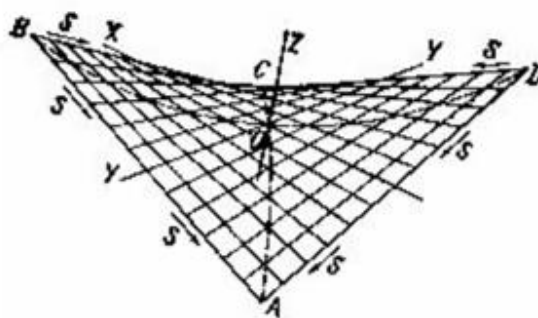


Рис. 4.2. Геометрична схема гіперболічного параболоїду

Подвійна природа гіпару обумовлюється способами його утворення, що наведені вище, які наведені нижче.

Одним із різновидів гіпарів є сідлоподібна оболонка (рис. 4.3, а та рис. 4.4). Вона обмежена чотирма лініями головних кривин. Дві групи твірних її поверхні проектується на площину плану у вигляді двох груп (сімейств)

паралельних прямих. Сідлоподібні оболонки типу гіпар характеризуються тим, що відношення стріл підйому їх контурних ліній та відношення сторін мають значення 4, 16, 36 й т.д. При таких співвідношеннях перерізуючі зусилля на конурі є відсутніми, а в самій товщі оболонки виникають постійні по довжині нормальні зусилля.

Перевага сідлоподібних гіпарів полягає в тому, що опалубку влаштувають досить просто не зважаючи на подвійну кривину оболонки. Опалубку влаштувають із прямих дошок, що вкладені вздовж одного із сімейств прямолінійних твірних.

Окрім того, що поверхня гіперболічного параболоїду може бути створена трансляцією прямої, що є твірною, по двом направляючим, що розташовані навхрест (рис. 4.3, б), вона утворюється також ковзанням (перенесенням) твірної параболі по параболі, що є направляючою. Параболи при цьому повинні бути різних напрямлень – опуклого та випуклого (рис. 4.3, а).

Найбільш простий та найбільш поширений, зокрема в будівельній практиці, метод утворення поверхні гіпарболічного параболоїду – зсув по вертикалі одного або двох кутів плоского чотирикутника. Внаслідок цього плоский чотирикутник стає просторовим, тобто зазнає викривлення (рис. 4.3, в). Часто фрагмент гіпарболічного параболоїду, що характеризується прямолінійними контурами, називають скрученим прямокутником у вигляді ромбу чи паралелограму. Форму скрученого прямокутника можна одержати також, якщо один бік цього плоского прямокутника повернути на кут φ по відношенню до його площини, зафіксувавши протилежний бік (рис. 4.3, г). У залежності від величини кута φ утворюється більша або менша кривина поверхні.

Наведені приклади утворення поверхні гіпару вказують на його подвійну природу - він одночасно є і лінійчатою поверхнею, і поверхнею переносу. Звідси виходить факт, що поверхня гіпару характеризується направляючими двох родів – криволінійні параболічні та прямі. Будь-яка точка

поверхні гіпару є точкою перетину двох парабол й двох прямих, які належать поверхні. Важливо вказати на взаємне розташування твірних поверхні обох типів – парабол та прямих.

Із рис. 4.4 видно, що напрямки параболічних й прямолінійних твірних перетинаються під певним кутом $\omega/2$. Отже, параболічні твірні пролягають по діагоналям ячеек сітки, яка створена двома типами прямолінійних твірних. Таке взаєморозміщення твірних двох видів обґрунтовує специфіку статичної роботи гіпару.

Так як гіпар є поверхнею переносу, то будь-який перетин його площинами, що паралельні площинам YOZ , являє собою конгруентні параболи. Пертинаючи поверхню гіпару горизонтальними площинами, що паралельні площині XOY , отримуємо гіперболи (рис. 4.5). Звідси й походить назва поверхні – «гіперболічний параболоїд».

Однією з головних й важливих позитивних властивостей поверхні гіпару є те, що в кожній точці поверхні не виникає кручення від зовнішнього навантаження. відсутність кручення (у кожній точці поверхні має місце

змішана похідна $\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0$). Це істотно полегшує розрахунок такого типу поверхонь.

При ефективному виборі відповідної геометрії поверхні гіпару, характеризуються досить високою несучою здатністю. Кривина поверхні різного знаку обумовлює кривиною різного знаку у двох напрямках, що є взаємоперпендикулярними. В оболонці типу гіпар виникають зусилля стиску за напрямом парабол, що обернені гілками вниз й сили розтягу виникають у напрямку парабол, що обернені гілками вгору (рис. 4.3, рис. 4.2)

За дії рівномірно розподіленого навантаження по поверхні оболонки нормальні (перпендикулярні) зусилля, які діють вздовж її твірних, характеризуються постійністю по їх довжині. Це означає, що поперечне навантаження на контурі оболонки є відсутнім та контур завантажено тільки

погонними силами зсуву. Отже, нормальні головні зусилля виникають в перетинах оболонки, та які розташовані під кутом 45° відносно твірних.

Для сприйняття зусиль зсуву по контуру гіперболічної поверхні улаштовуються бортові елементи або ребра. В них, в залежності від взаємного розташування оболонок в покритті можуть з'являтися зусилля стиску чи зусилля розтягу.

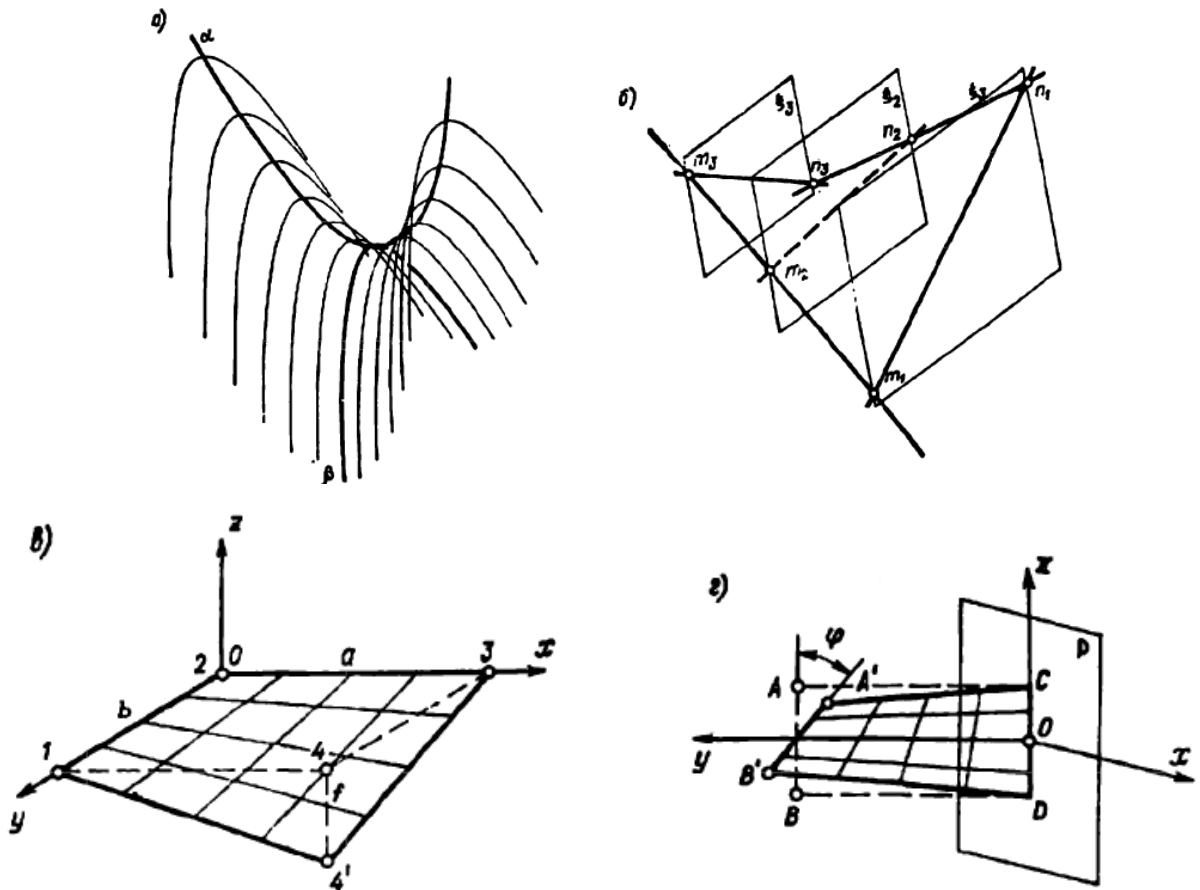


Рис.4.3 Способи утворення поверхні гіпару

а–поверхня гіпару утворена переміщенням параболі; б – те ж прямою по направляючим, що лежать навхрест; в,г – гіпар – просторовий чотирикутник

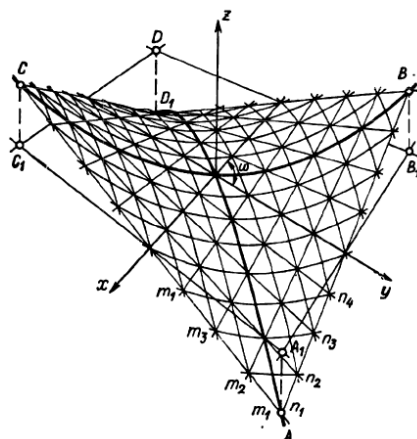


Рис.4.4 Гіпар – система прямолінійних та криволінійних твірних

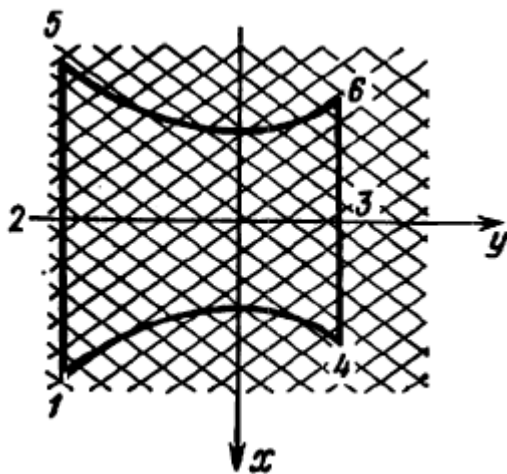
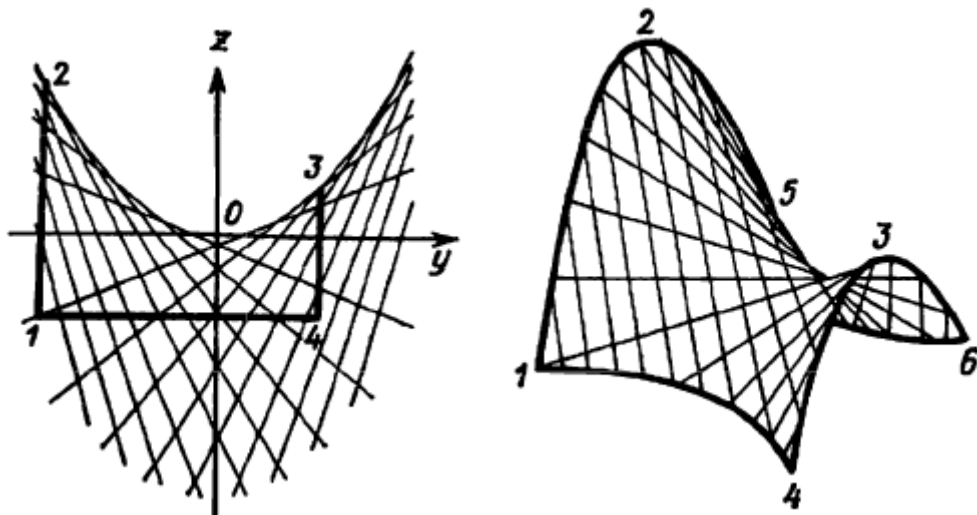


Рис. 4.5 Фрагмент оболонки з криволінійними контурами, що утворена перерізами поверхні двома вертикальними площинами та горизонтальною площиною

Форми обонок за типом гіпар досить легко втілити в життя, а принципи статичної роботи є досить нескладними. Особливостями оболонок є те, що вона не здатна сприймати суттєвих вертикальних навантажень, які прикладено до її країв. Сюди потрібно враховувати й навантажень від власної ваги бортових елементів. Необхідно звертати значну увагу на розрахунок й на конструювання бортових елементів та їх стикування з оболонкою.

Несиметричні навантаження на оболонку, що є також можливими, можуть викликати неврівноважені зусилля у бортових елементах. В такому випадку рівновага оболонки взагалі, як цілісної жорсткої системи, є можливою лише завдячуючи тільки розвитку деформацій вигину. Як свідчить практика, у більшості випадків достатнім є розрахунок оболонок типу гіпарів згідно безмоментній теорії. Вона придатна для досить жорстких оболонок за

невеликих прольотів. Існують такі форми поверхонь гіпарів, що потребують врахування моментів вигину.

Зважаючи на багатоманітність форм оболонок не є можливим надання універсальних рекомендації стосовно їх розрахунку. Парм надає вказівки відносно того, що моментами вигину можна нехтувати, у випадку коли відношення висоти підйому оболонки до довжини її сторони у плані більше ніж 0,2.

4.3. Відомості щодо складених в плані гіперболічних оболонок

Оболонки від'ємної Гаусової кривини, що є складеними на квадратному чи прямокутному плані, можуть бути застосовані для будівель із прямокутним планом із співвідношенням сторін від 1:1 до 1:2. Оболонками, що є складеними, перекриваються прольоти від 12 до 60 м. Класифікують оболонки: пологі із стрілою підйому f від $1/10$ до $1/5$ прольоту та вшарушені (непологі) оболонки із стрілою підйому f від $1/5$ до $1/2$ прольоту. Конструктивно оболонка містить такі конструктиви: шкаралупа (власне тонка облонка), бортові елементи (криволінійні чи прямолінійні балки), на які спирається оболонка. Висота перерізу бортового елемента оболонки приймається у межах від $1/40$ до $1/80$ прольоту. Це залежить від умов спирання конструкції й величини прольоту. Бортові елементи обпираються на діафрагми, у вигляді ферм, балок. Бортові елементи також можуть спиратися на колони чи суцільні стіни, рис. 4.6.

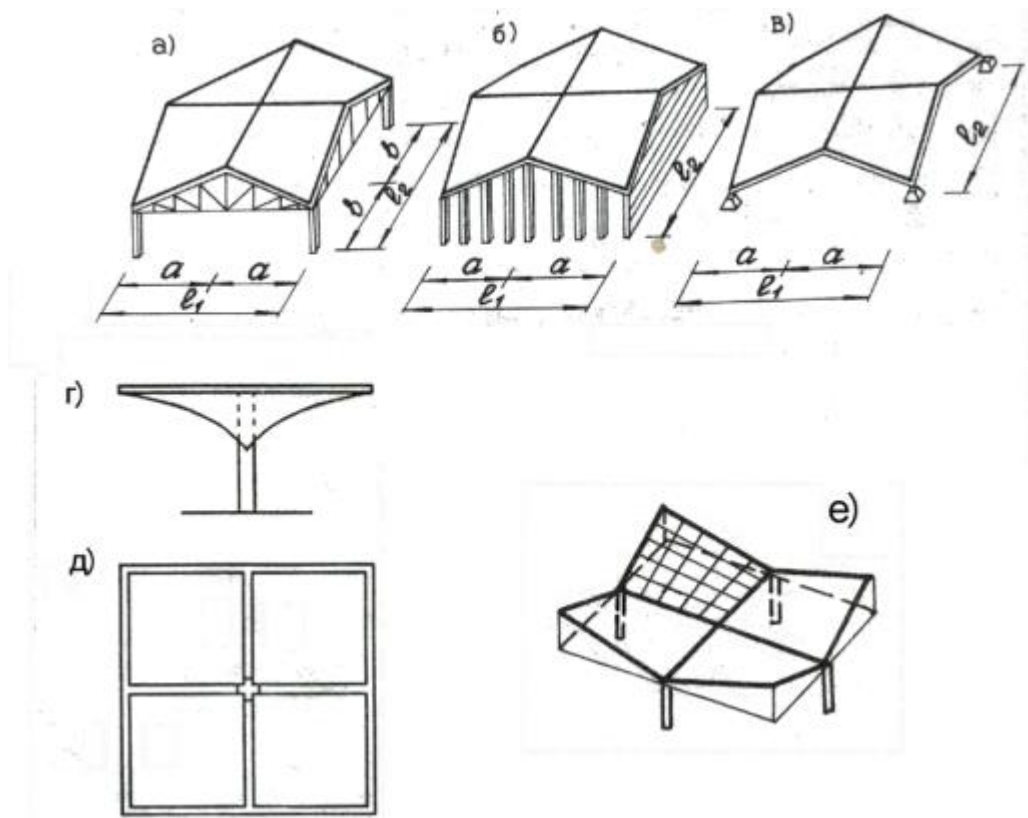


Рис. 4.6 Залізобетонні гіпари на квадратному плані:

а ÷ в – шатровий гіпар; а – зі спиранням на ферми; б – зі спиранням на колони і стіни; в – зі спиранням в спадаючих кутах на фундамент; г, д – гіпару типу «грибок»; е – типу «квітка»

У випадку спирання контурних елементів на залізобетонні колони, розміри поперечного перетину колон забезпечувати їх гнучкість відносно будь-якої вісі (гнучкість $\lambda \leq 120$). Для колон із прямокутним перерізом така умова забезпечується, коли ширина колони визначається за формулою:

$$b_k = 7H_k/120,$$

де: b_k – ширина перетину колони; H_k – висота колони. (4.2)

Товщина оболонок призначається в границях $1/400 \div 1/600$ від прольоту гіпарболічної оболонки, але, за конструктивними вимогами, повинна бути не меншою 40 мм. При прольоті гіпару більше 36,0 м є можливим влаштування ребер із висотою перерізу від $(1/100 \text{ до } 1/120)l$. Ширину ребер прийнято в межах від $1/5$ до $1/2$ їх висоти перерізу. В місцях стикування оболонки з бортовими елементами треба передбачити збільшення товщини оболонки у 1,5 – 2 рази для розташування другого ряду арматурних стержнів. Ці стержні

призначені для сприйняття приопорних моментів вигину. Такі з'єднання слід виконувати гладкими й на ширині не менше 10-ти товщин оболонки від бортового елемента.

Розглядаючи статичну роботу можна вважати, що опуклі параболи працюють подібно до арок на стиск, а зони, що є увігнутими, працюють на розтягування подібно до гнучких ниток. Стиснуті зони перевіряють на стійкість.

Стійкість оболонки вважають забезпеченою, коли середня інтенсивність розподіленого навантаження q_{av} не є більшою за її критичне значення q_{cr}

$$q_{av} \leq q_{cr} = 0,05 E_b \cdot t^2 / (R_{av})^2, \quad (4.3)$$

де: E_b – початковий модуль пружності бетону; t – товщина оболонки; R_{av} – середній радіус кривизни головної опуклої параболи оболонки (вздовж діагоналі основи), обраховуються за співвідношенням:

$$R_{av} = (\ell^2 / 8f_p) + f_p / 2, \quad (4.4)$$

де: f_p – стріла підйому опуклої параболи оболонки, що визначається у середині діагоналі гіпару; ℓ – довжина діагоналі основи гіпару.

Лінії стикування оболонок на плані називаються лініями коньків. У залежності від кута нахилу їх та ухилу ліній зовнішнього контуру утворюються оригінальні й різноманітні конструктивні схеми. За контуру такі оболонки, як правило, обпираються на жорсткі ферми, чи на балки, чи на стійки фахверку. Впродовж ліній коньку розміщено балки відносно малої жорсткості. Таким чином, спирання указаних оболонок по зовнішньому периметру (контурі) приближено розглядається як на абсолютно жорсткій конструкції у своїй площині й ідеально гнучкі із площини. Обпирання оболонок уздовж ліній конька розглядається як обпирання на пружні балки. Покриття в вигляді гіпарболічних параболоїдів переважно є пологими. На загальний напружений стан таких оболонок суттєво впливають прогини балок конька. Отже, для розрахунку систем з чотирьох оболонок на

прямокутному плані враховують кути θ_1 та θ_2 , під якими вони стикуються. Отже має місце врахування переломів поверхні по лініям коньків як для непологих оболонок.

Матеріал для проектування оболонок приймають: бетон класів С 16/20 та вище, проволочна та стержнева арматура. Для армування поля оболонки застосовують проволочну арматуру класу В400, діаметром 4 до 6 мм. Проволочна арматура влаштовується з кроком 100, 150 або 200 мм. Арматурні стрижні можуть розміщуватися як паралельно бокам основи, так й вздовж діагоналей основи (рис. 4.7).

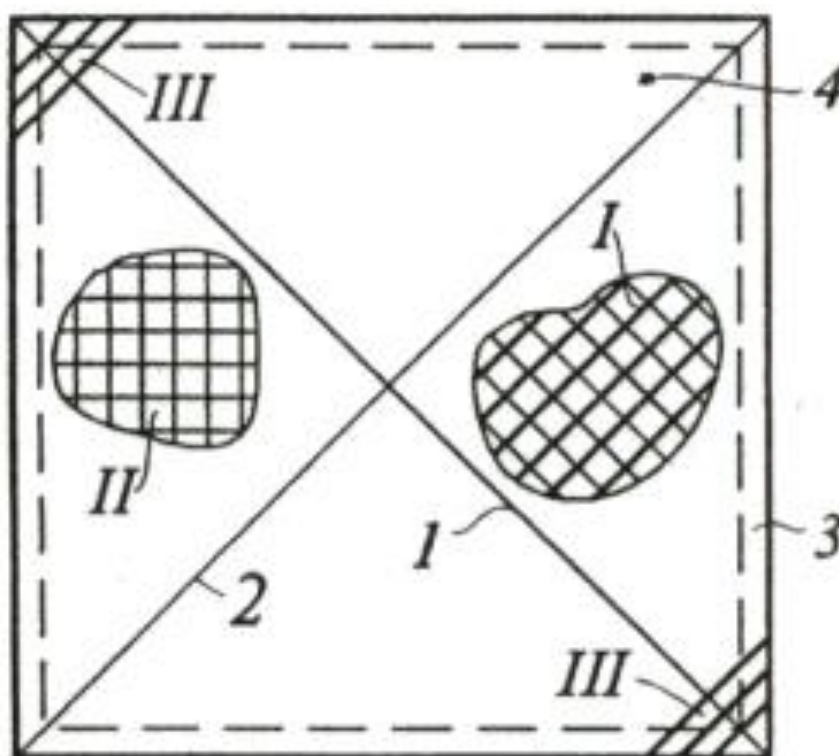


Рис. 4.7 Схеми армування гіпару:

- I – сітка зі стрижнями уздовж діагоналей; II – сітка зі стрижнями уздовж контурних елементів; III – додаткова арматура в кутових зонах;
1 – опукла головна парабола; 2 – увігнута головна парабола; 3 – бортовий елемент; 4 – власне оболонка

РОЗДІЛ 5

РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ ГІПЕРБОЛІЧНИХ ОБОЛОНОК

5.1 Моделі поверхонь, що досліджуються

Складені оболонки від'ємної гаусової кривизни, можуть бути застосовані для будівель з планом в вигляді прямокутника із співвідношенням сторін від 1: 1 до 1: 2.

Оболонки, які прийнто до дослідження, формоутворені за двома схемами, наведеними на рис. 5.1

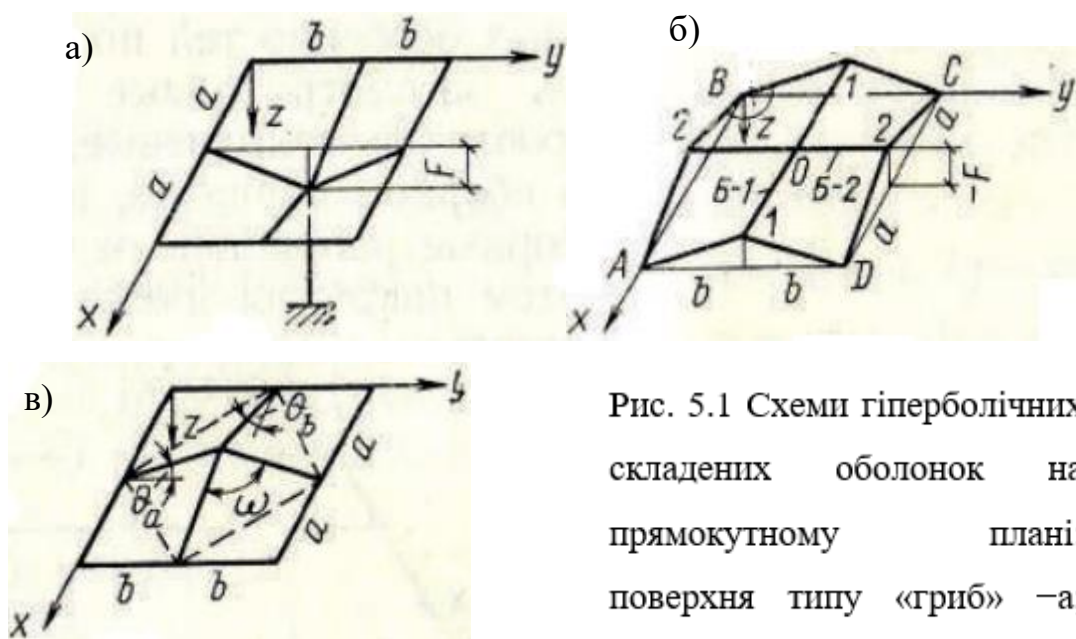


Рис. 5.1 Схеми гіперболічних складених оболонок на прямокутному плані: поверхня типу «гриб» – а; поверхня типу «шатер» – б,в



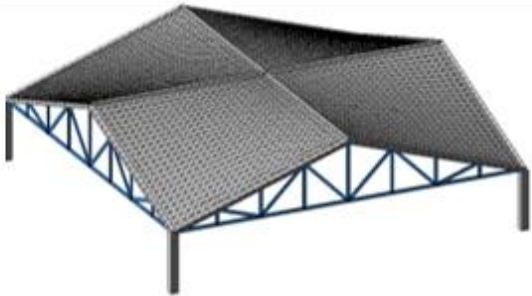

Розглянемо розрахунок двох типів складених оболонок під умовними назвами: «шатер» (складова оболонка з горизонтально розташованими коньками) – рис.5.5 та рис.5.6, «гриб» – рис. 5.3 та рис. 5.4 (оболонка з горизонтальним зовнішнім контуром і з опорою на одну центральну колону).

За першим типом поверхні (рис. 5.1, а) в ПК Ліра-САПР 2024 було створено дві моделі: схема №1 – «гіпар-грибок» (рис.5.3) та схема №2 – «гіпар-грибок з похилими стійками» (рис.5.4). Це оболонки, що характеризуються горизонтальним зовнішнім контуром й з опиранням на одну чи декілька центральних колон.

За другим типом поверхні (рис. 5.1, б) було створено модель №3 – гіпар – «шатер», кінці якого спираються на торцеві діафрагми жорсткості (ферми) – рис. 5.5 та схему №4 – гіпар – «шатер з підкосами», що спирається в чотирьох опорних точках на стійки, посилені два підкосами (рис.5.6).

Моделі поверхонь, що прийняті до розрахунку, наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 Гіперболічні оболонки, які досліджуються

Тип гіперболічної поверхні	№ схеми	Просторова модель поверхні	Розміри в плані, м
«Гриб»	1 гіпар-«гриб», що спирається на одну колону		24×24
	2 гіпар-«гриб», що спирається на чотири похилі колони		24×24
«Шатер»	3 гіпар- «шатер»		24×24
	4 гіпар-«шатер» з підкосами		24×24

5.2 Геометрія поверхонь та їх конструктивне вирішення

Поверхня складених оболонок (табл.5.1) складається з чотирьох зчленованих на квадратному плані базових гіпарів, за лініями стиків яких

улаштовуюються бортові елементи у вигляді прямих балок. Розміри поверхонь на прямокутному плані є однаковими, а саме: $2a = 24\text{ м} \times 2b = 24\text{ м}$. Тобто розміри в плані 1/4 поверхні становлять $12,0 \times 12,0\text{ м}$.

Серединна поверхня гіпару, що є базови, – 1/4 всієї оболонки, в координатах, представлених на рис. 5.2 виражається рівнянням:

$$Z = f_{xy} / (a b) \quad (5.1)$$

де: f – стріла підйому; a і b – розміри сторін прямокутної основи гіпару, що є базовим, відповідно за напрямками X і Y .

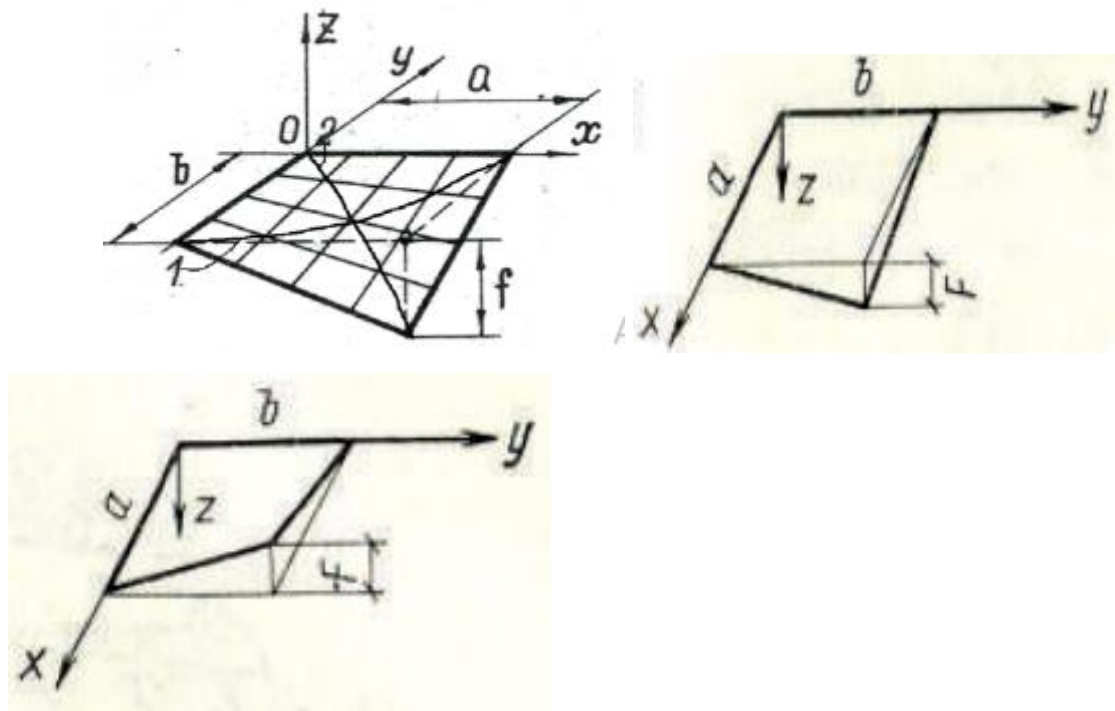


Рис. 5.2 Базовий гіперболічний параболоїд на прямокутному плані: для побудови оболонки типу «грибок»- а; для побудови оболонки типу шатер (схема №3)-б; для побудови оболонки типу шатер з підкосами (схема №4)-в; 1 – головна увігнута параболола; 2 – те ж, опукла

5.2.1 Конструктивне вирішення оболонок за схемами №1 та №2 та перевірка їх стійкості

В якості базової приймаємо оболонку на квадратному плані, зі стороною $a = 12\text{ м}$, рис.5.1, а. Приймаємо геометричні параметри базового гіпару:

$f = 24\text{ м} / 6 = 4\text{ м}$; висота контурних елементів

$h_{\text{кон}} = 24\text{ м} / 80 = 0,3\text{ м} = 30\text{ см}$; ширину зовнішніх контурних елементів з

конструктивних міркувань приймаємо рівній висоті $b_{з.кон} = 30$ см, а ширину внутрішніх контурних елементів $b_{в.кон} = 50$ см. товщина середньої частини оболонки $t = 12 \text{ м} / 200 = 0,06 \text{ м}$; приймаємо $t = 7$ см.

Опорну колону приймаємо перерізом 50×50 см для схем №1 та №2.

Форма серединної поверхні базової оболонки буде описуватися співвідношенням (5.1):

$$z = 4xy / (12^2) = xy / 36$$

5.2.1.1 Перевірка стійкості оболонок типу «гриб»

Перевіримо стійкість оболонки за співвідношенням (4.3).

Згідно обчислень за табл. 5.6 повне розрахункове навантаження на оболонку:

$$q_{ав} = 507 + (0,07 \cdot 25000 \cdot 1,1) + 1867,32 = 4299,32 \text{ Н/м}^2.$$

$$q_{кр} = 0,05 E_b \cdot t^2 / (R_{ав})^2 = 0,05 \cdot 30000 \cdot 100 \cdot 0,072 / (36,5)^2 = 0,5516 \text{ т/м}^2 = 5516 \text{ Н/м}^2;$$

$$5516 \text{ Н/м}^2 > 4299,32 \text{ Н/м}^2.$$

Стійкість забезпечена.

Товщина оболонки в місці примикання до бортового елемента на ширині 1,0 м плавно змінюється від 14 см до 7 см (для звичайно елементної схеми: в смузі 0,5 м від контурного елемента – 11 см, в смузі від 0,5 м до 1 м – 9 см, див. рис.5.3.

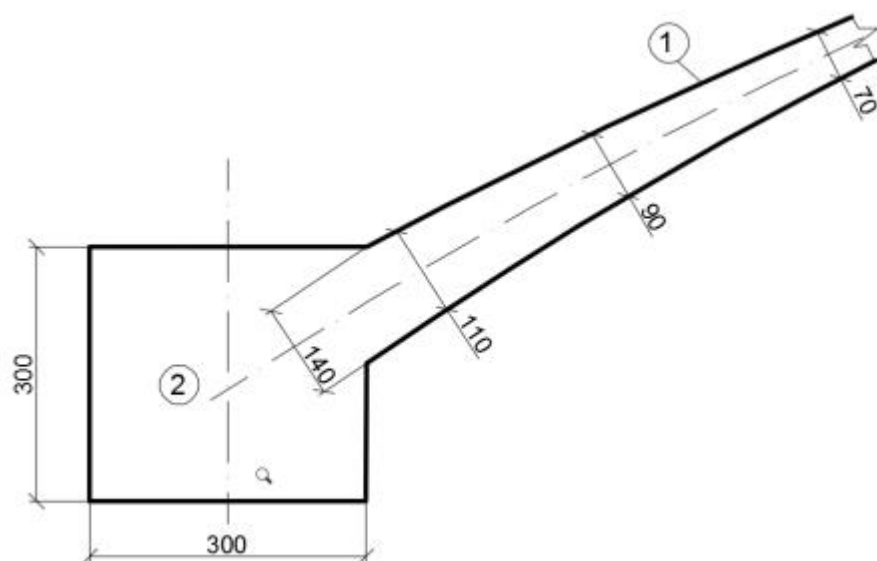


Рис. 5.3 Примикання оболонки до бортового елемента: 1 – оболонка; 2 – бортовий елемент

5.2.2 Конструктивне вирішення оболонок за схемами №3 та №4 та перевірка їх стійкості

В якості базової приймаємо оболонку на квадратному плані, зі стороною $\alpha = 12$ м, рис.5.1, б.

Висота опорних колон 4,0 м. В якості діафрагм приймаємо металеві ферми, в яких верхнім поясом є бортовий елемент оболонки. Довжину панелі ферми приймаємо рівною 3 м. У якості нижнього поясу приймаємо прямокутні труби перетином $260 \times 160 \times 8$ мм, для решітки використовуємо такі ж труби квадратного перетину 160×8 мм.

Збірку схеми виконуємо в препроцесорів САПФІР, а розрахунок і конструювання в програмному комплексі «ЛІРА-САПР». В якості базової приймаємо оболонку на квадратному плані, зі стороною $\alpha = 12$ м. Приймаємо геометричні параметри базового гіпару: $f = 24 \text{ м} / 6 = 4 \text{ м}$; висоту контурного елемента $h_{\text{кон}} = 24 \text{ м} / 80 = 0,3 \text{ м} = 30 \text{ см}$, ширину контурного елемента з конструктивних міркувань приймаємо рівною висоті $b_{\text{кон}} = 30 \text{ см}$; товщина середньої частини оболонки $t = 12 \text{ м} / 300 = 0,04 \text{ м}$; приймаємо $t = 5 \text{ см}$. Форма серединної поверхні базової оболонки буде описуватися співвідношенням (5.1):

$$z = \frac{4xy}{122} = \frac{xy}{36}$$

5.2.2.1 Перевірка стійкості оболонок типу «шатер»

Перевіримо стійкість оболонки за співвідношенням (5.2). Обчислимо середній радіус кривизни головної опуклої параболі:

$$\varrho = (\alpha^2 + b^2)^{0,5} = (12^2 + 12^2)^{0,5} = 16,97 \text{ м.}$$

Обчислюємо стрілу підйому головної опуклої параболі базового гіпару. Максимальна стріла підйому f_p знаходиться в точці з координатами $x = \alpha/2$, $y = b/2$. За співвідношенням (4.4) знаходимо:

$$f_p = z(\alpha/2, b/2) = f \cdot (\alpha/2 \cdot b/2) / (\alpha b) = f / 4 = 4 / 4 = 1 \text{ м.}$$
$$R_{av} = \varrho^2 / (8f_p) + f_p / 2 = 16,97^2 / (8 \cdot 1) + 1/2 = 36,5 \text{ м,}$$

Обчислюємо критичне навантаження:

$$q_{cr} = 0,05 E_b \cdot t^2 / (R_{av})^2 = 0,05 \cdot 30000 \cdot (100) \cdot 0,05^2 / (36,5)^2 = 0,281 \text{ т/м}^2 = 2810 \text{ Н/м}^2.$$

Повне розрахункове навантаження на оболонку:

$$q_{av} = 507 + 1375 + 1867,32 = 3749,32 \text{ Н/м}^2.$$

$$q_{cr} = 2810 \text{ Н/м}^2 < 3749,32 \text{ Н/м}^2.$$

Стійкість оболонки не забезпечена. Збільшуємо товщину оболонки до $t = 7$ см.

Перераховуємо повне розрахункове навантаження на оболонку:

$$q_{av} = 507 + (0,07 \cdot 25000 \cdot 1,1) + 1867,32 = 4299,32 \text{ Н/м}^2$$

$$q_{cr} = 0,05 E_b \cdot \frac{t^2}{(R_{av})^2} = 0,05 \cdot 30000 \cdot 100 \cdot \frac{0,07^2}{(36,5)^2} = 0,5516 \frac{\text{т}}{\text{м}^2} =$$

$$5516 \text{ Н/м}^2$$

Висновок: стійкість забезпечена.

Товщина оболонки в місці примикання до бортового елемента на ширині 1,0 м плавно змінюється від 14 см до 7 см (для скінченоелементної схеми: в смузі 0,5 м від контурного елемента – 11 см, в смузі від 0,5 м до 1 м – 9 см), рис. 5.3.

На рис. 5.3–5.4 наведено кінцевоелементні та просторові схеми оболонок за першим типом поверхні – поверхні типу «гриб».

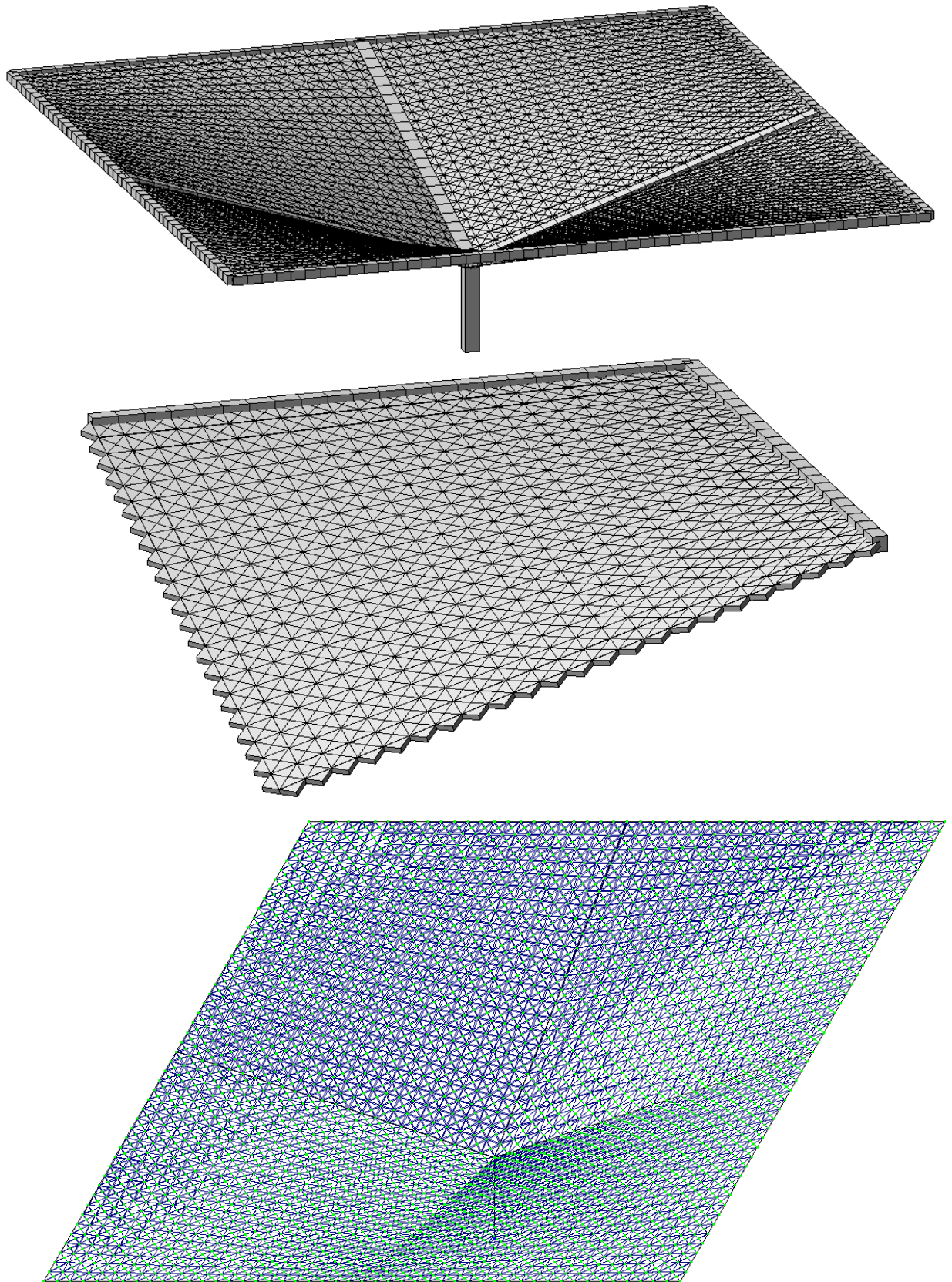


Рис.5.3 Просторова модель оболонки («гіпар-гриб») (а); $\frac{1}{4}$ фрагменту просторової моделі (б) та кінцевоелементна схема №1 (в)

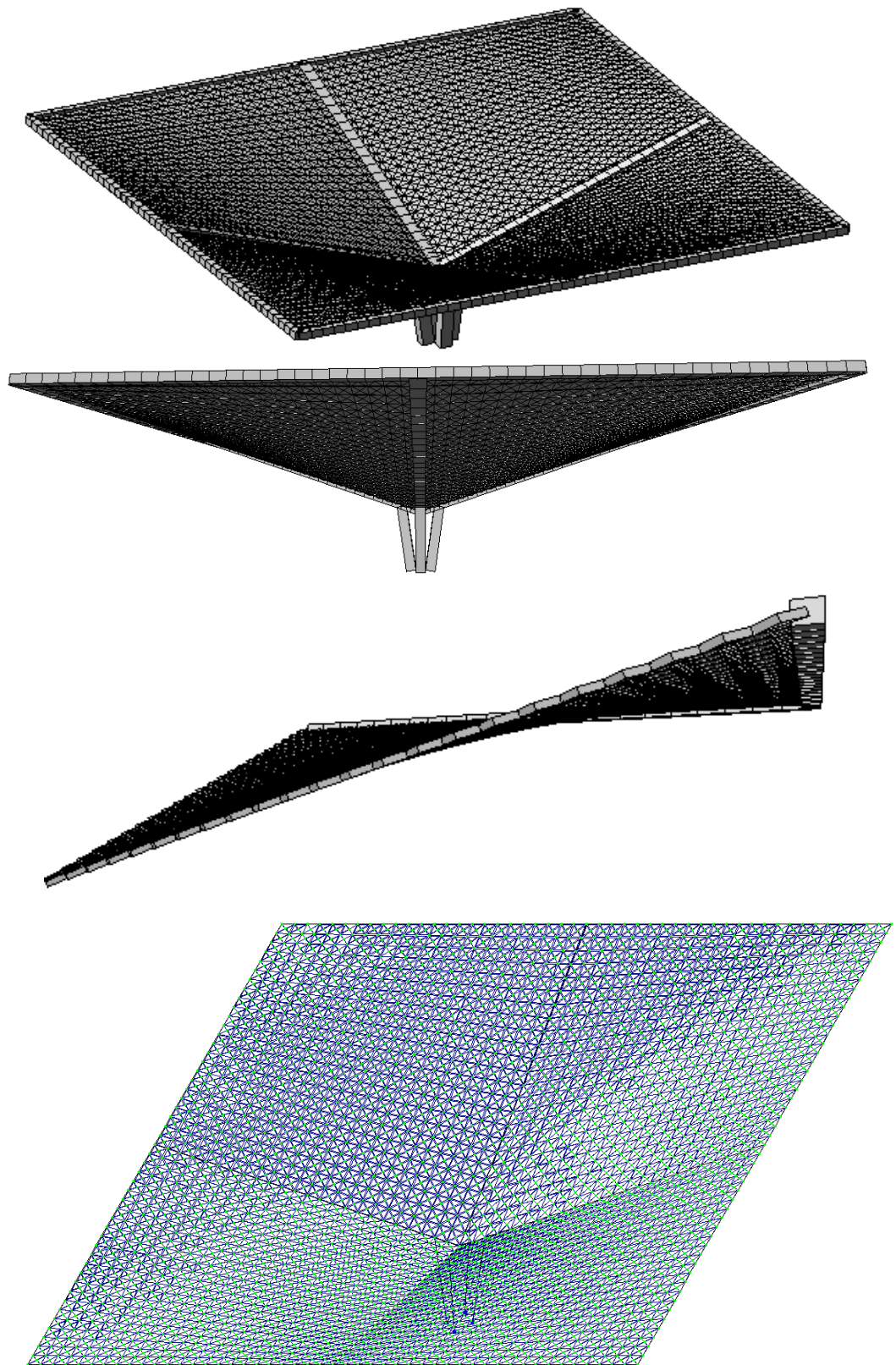


Рис. 5.4 Просторова модель оболонки «гіпар-гриб з похилими стійками» (а);
 $\frac{1}{4}$ фрагменту просторової моделі (б) та кінцевоелементна схема №2 (в)

На рис. 5.5–5.6 наведено скінченоеlementну та просторові схеми оболонки за першим типом поверхні – поверхні типу «шатер».

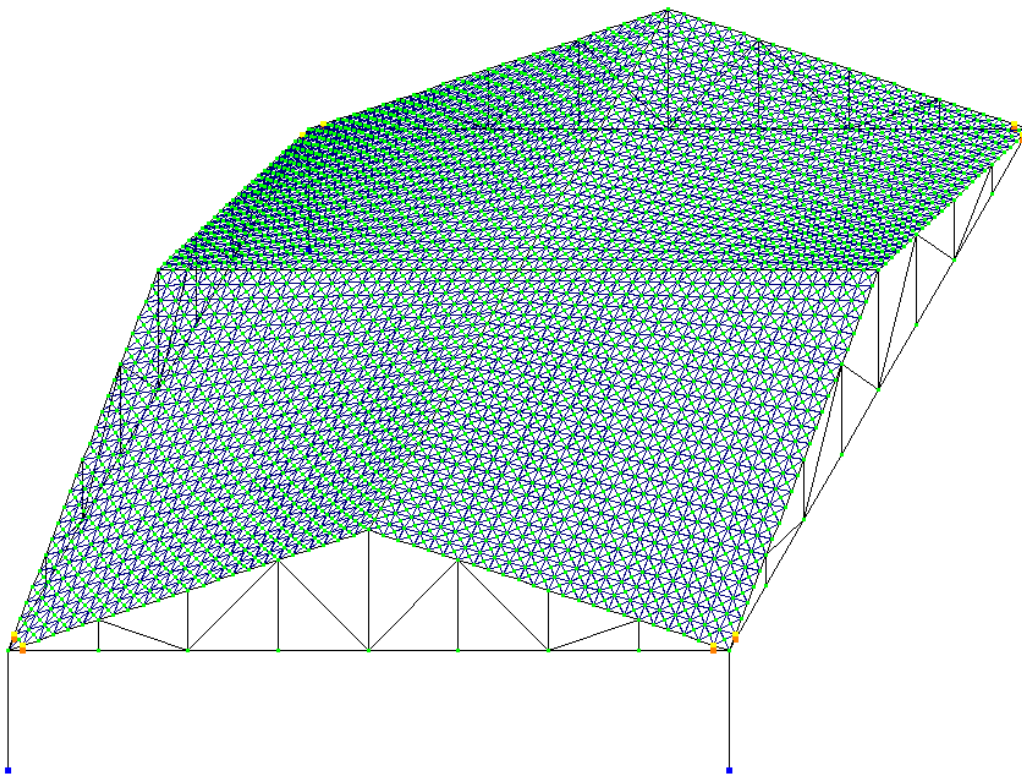
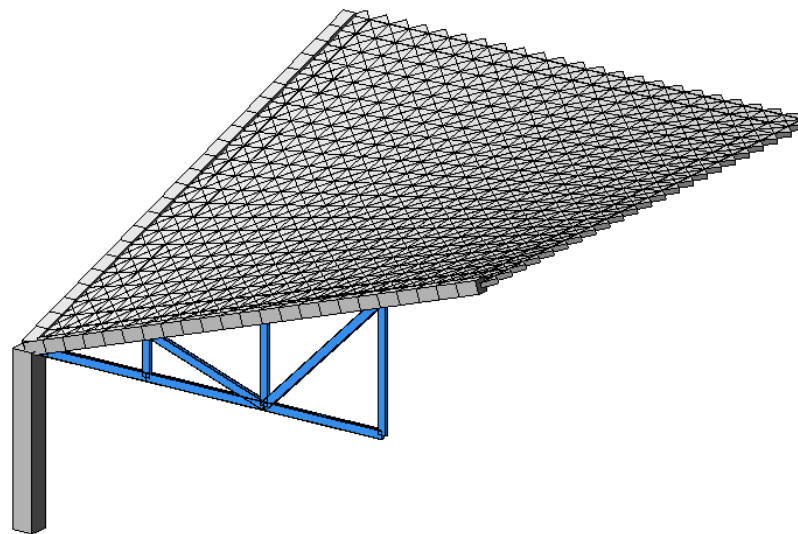
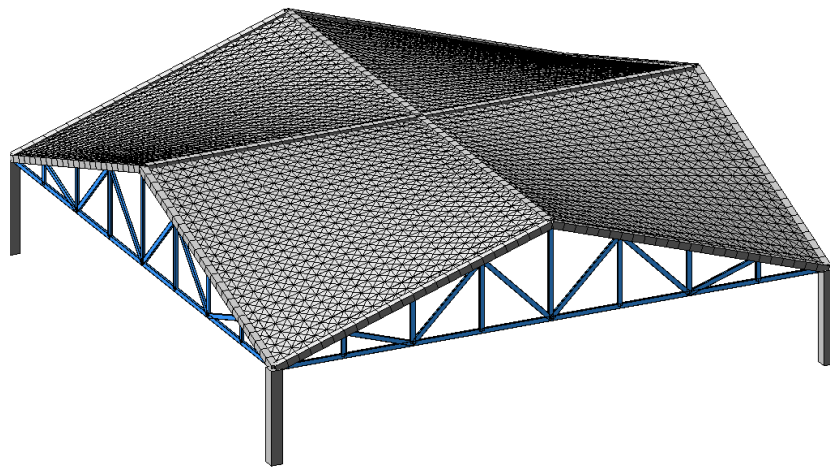
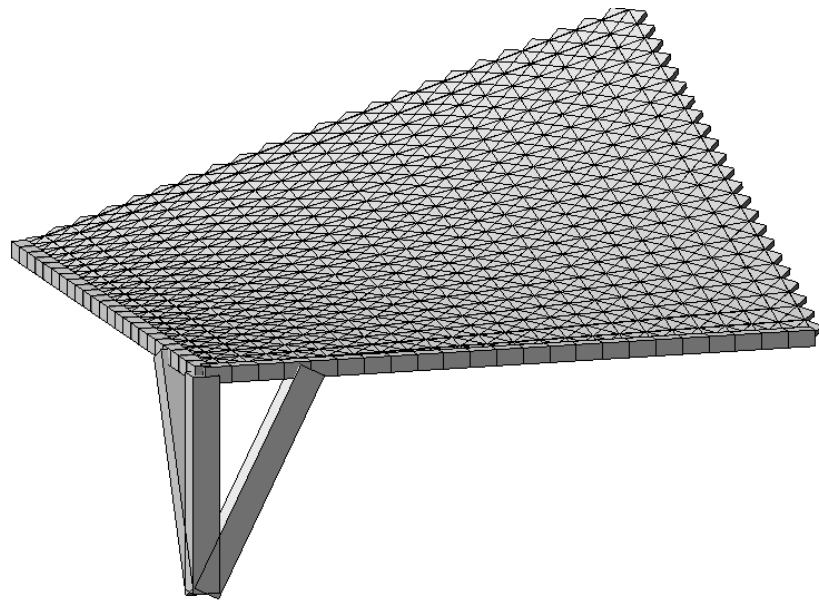
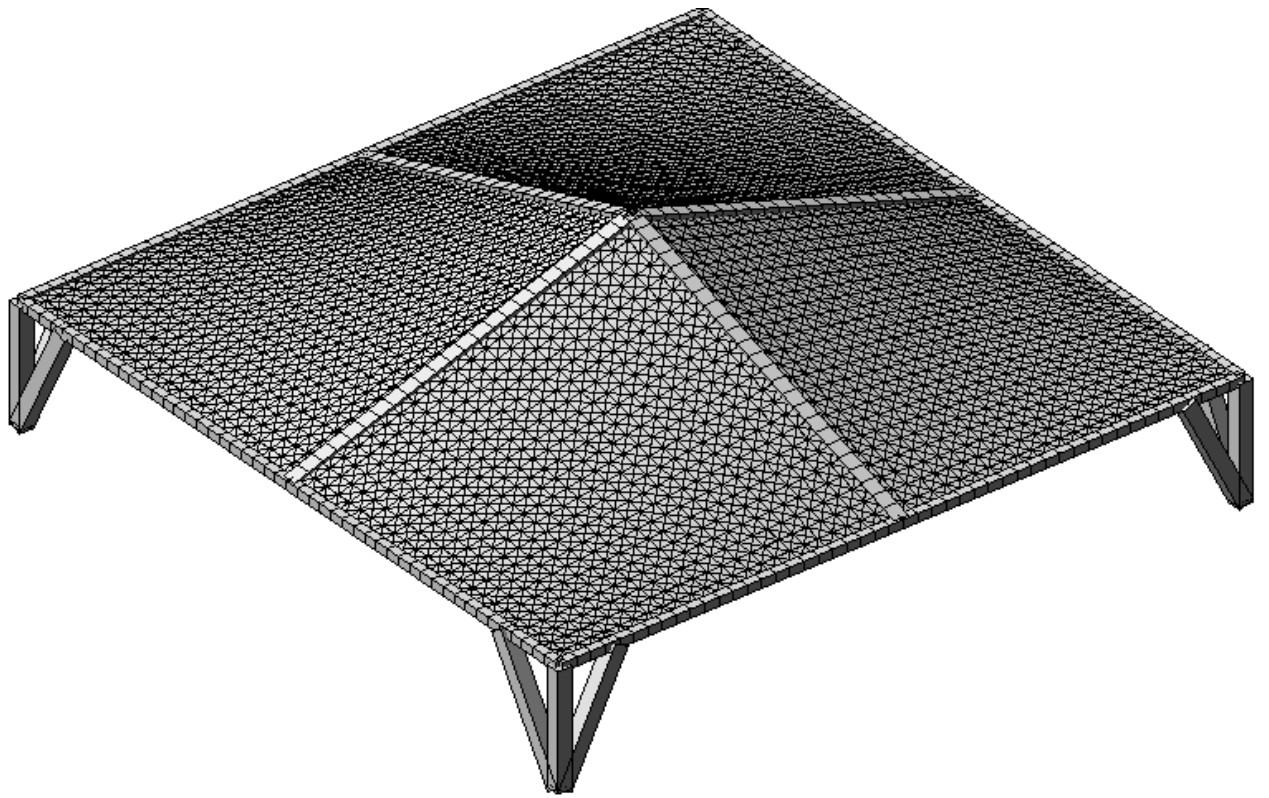


Рис.5.5 Просторова модель оболонки типу «гіпар-шатер» (а); $\frac{1}{4}$ фрагменту просторової моделі (б) та скінченоелементна схема №3 (в)



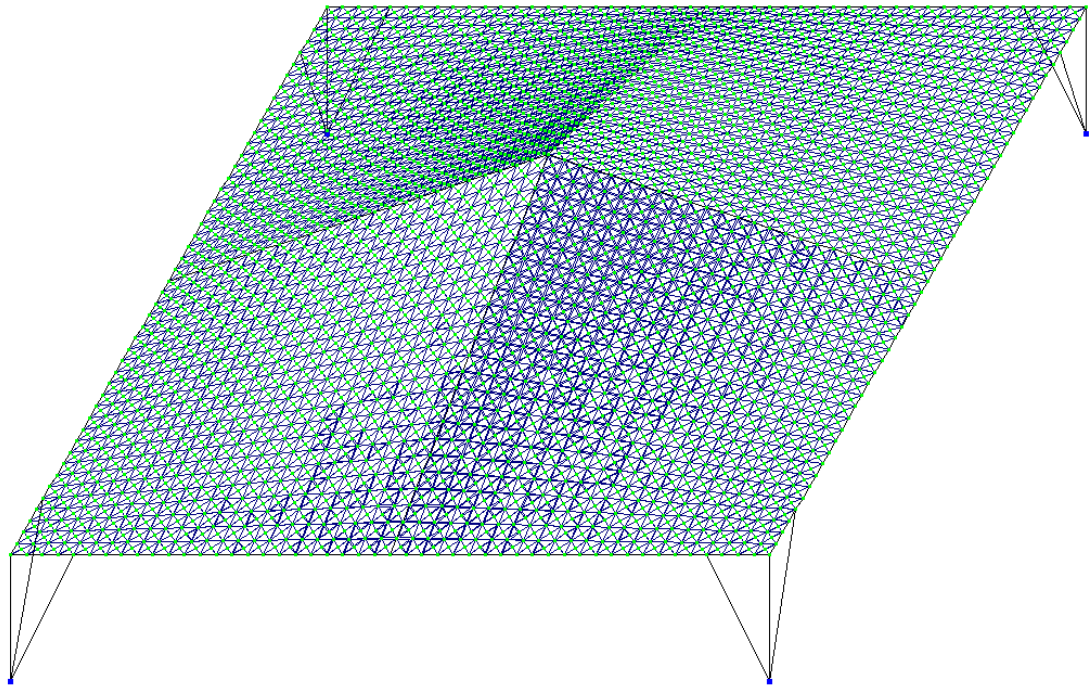


Рис.5.6 Просторова модель оболонки типу («гіпар з підкосами» (а)); $\frac{1}{4}$ фрагменту просторової моделі (б) та кінцевоелементна схема №4 (в)

5.3 Матеріал для оболонок

Характеристики матеріалу оболонок прийняті наступними: важкий бетон класу С 20/25 ($E_{cd}=30,0$ ГПа , $f_{cd}=14,5$ МПа= $1478,08$ т/м², $f_{ctd}=1,0$ МПа= $101,9$ т/м²).

Для власне оболонок приймаємо дротяну арматуру класу В400, $f_{yd}=410$ МПа, для бортових елементів і колон арматуру класу А400, $f_{yd} = 365$ МПа

5.4 Жорсткісні характеристики елементів схем

Всі основні конструктивні елементи оболонок оболонок (середні ребра жорсткості, контурна бортова балка) для всіх чотирьох схем мають однакові характеристики жорсткості та однакові розміри (табл.5.2–5.5). Товщина поля оболонки є змінною й складає від 7,0 до 11,0 см. Розподіл товщини оболонки по її площі наведено на рис.5.7.

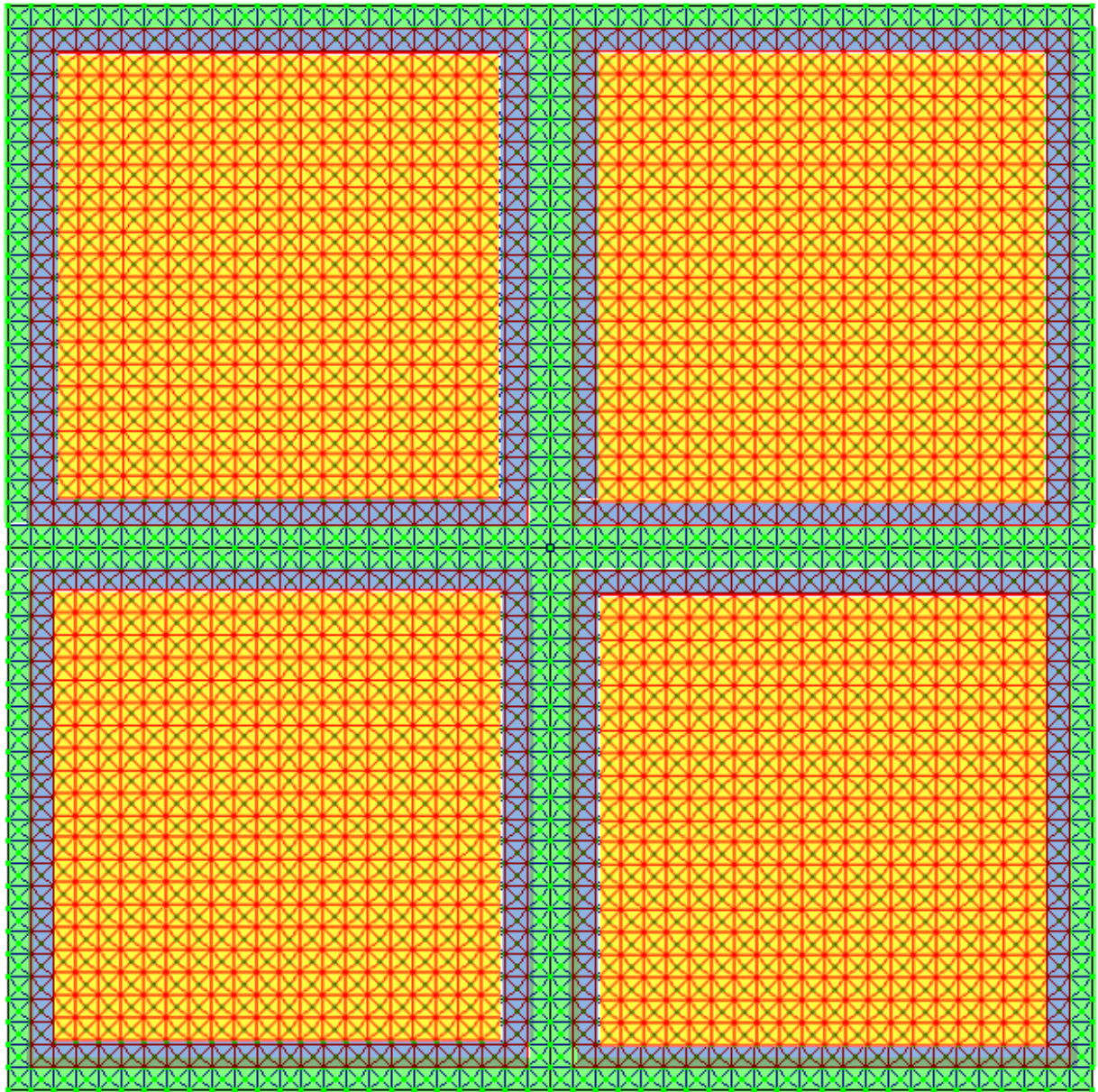



Рис. 5.7 Розподіл товщини оболонки:  – товщина поля 7,0 см;

 – товщина поля 9,0 см;  – товщина поля 11,0 см

В таблицях 5.2–5.5 наведено характеристики жорсткості для кінцевоелементних схем за рис. 5.3–5.6.

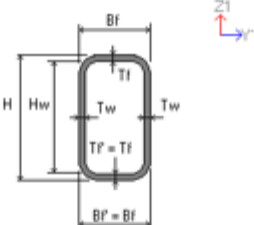
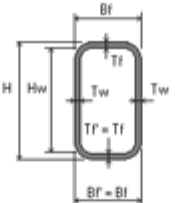
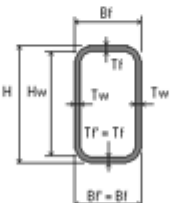
Таблиця 5.2 Характеристики жорсткостей конструктивних елементів оболонки типу гіпар-гриб (схема №1)

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м ²	R, т/м ³	μ
Тонкостінна оболонка змінної товщини	7,9,11	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Бортовий контурний елемент	30×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Конькові балки (середні)	50×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Колона	50×50	3,06·10 ⁶	2,5	0,2

Таблиця 5.3 Характеристики жорсткостей конструктивних елементів оболонки типу гіпар-«гриб» на чотирьох похилих колонах (схема №2)

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м ²	R, т/м ³	μ
Тонкостінна оболонка змінної товщини	7,9,11	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Бортовий контурний елемент	30×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Конькові балки (середні)	50×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Колона	50×50	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Похилі стійки	50×50	3,06·10 ⁶	2,5	0,2

Таблиця 5.4 Характеристики жорсткостей конструктивних елементів оболонки типу гіпар –«шатер» (схема №3)

Назва елемента	Поперечний переріз, см	$E, \tau/\text{м}^2$	$R, \tau/\text{м}^3$	μ
Тонкостінна оболонка змінної товщини	7,9,11	$3,06 \cdot 10^6$	2,5	0,2
Бортові контурні балки	30×30	$3,06 \cdot 10^6$	2,5	0,2
Конькові балки (середні)	30×30	$3,06 \cdot 10^6$	2,5	0,2
Колони	50×50	$3,06 \cdot 10^6$	2,5	0,2
Нижній пояс ферм	 <p>Профіль «Молодечно» 240×160×8</p>	$3,06 \cdot 10^6$	2,5	0,3
Сійки ферм	 <p>Профіль «Молодечно» 160×160×8</p>	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3
Розкоси ферм	 <p>Профіль «Молодечно» 160×160×8</p>	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3

Таблиця 5.5 Характеристики жорсткостей конструктивних елементів оболонки типу гіпар –«шатер» з підкосами (схема №4)

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м ²	R, т/м ³	μ
Тонкостінна оболонка змінної товщини	7,9,11	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Бортові контурні балки	30×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Конькові балки (середні)	50×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Вертикальні стійки	50×50	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Підкоси	50×50	50×50	2,5	0,2

5.5 Навантаження на оболонки

Навантаження приймаємо за даними таблиці 5.6. В якості основного сполучення навантажень (РСН1) приймаємо власну вагу з/б оболонки, вагу покрівлі та снігове навантаження на все поле оболонки.

Визначення головних напружень, що характеризують НДС оболонки будемо виконувати від РСН 1.

Таблиця 5.6 Навантаження на 1 м² поверхні оболонки

	Назва елементів конструкції	Характеристичне значення навантаження, (Н/м ²)	Коефіцієнт надійності за навантаженням γ_f	Розрахункове значення навантаження (Н/м ²)
I. Постійне навантаження				
1.	Покрівля з м'яких рулонних матеріалів	100	1,3	130
2.	Вирівнюючий шар із шпатлівки по армованій пластмасовій сітці $t=1,0$ см, $\rho = 2000$ Н/м ³	200	1,3	260
3.	Утеплювач із піноплексу $t=10,0$ см на клею $\rho = 800$ Н/м ³	80	1,3	104

4.	Пароізоляція	10	1,3	13
5.	Власна вага залізобетонної оболонки $t=5,0$ см, $\rho = 25000$ Н/м ³ , $g_{нор}=1250$ Н/м ² , $g_{рас}=1375$ Н/м ²	Враховується автоматично при роботі комплексу ЛІРА-САПР		
Всього постійне:		390	1,3	507
II. Тимчасове (снігове) навантаження				
6.	м. Суми	1638,3	1,14	1867,32

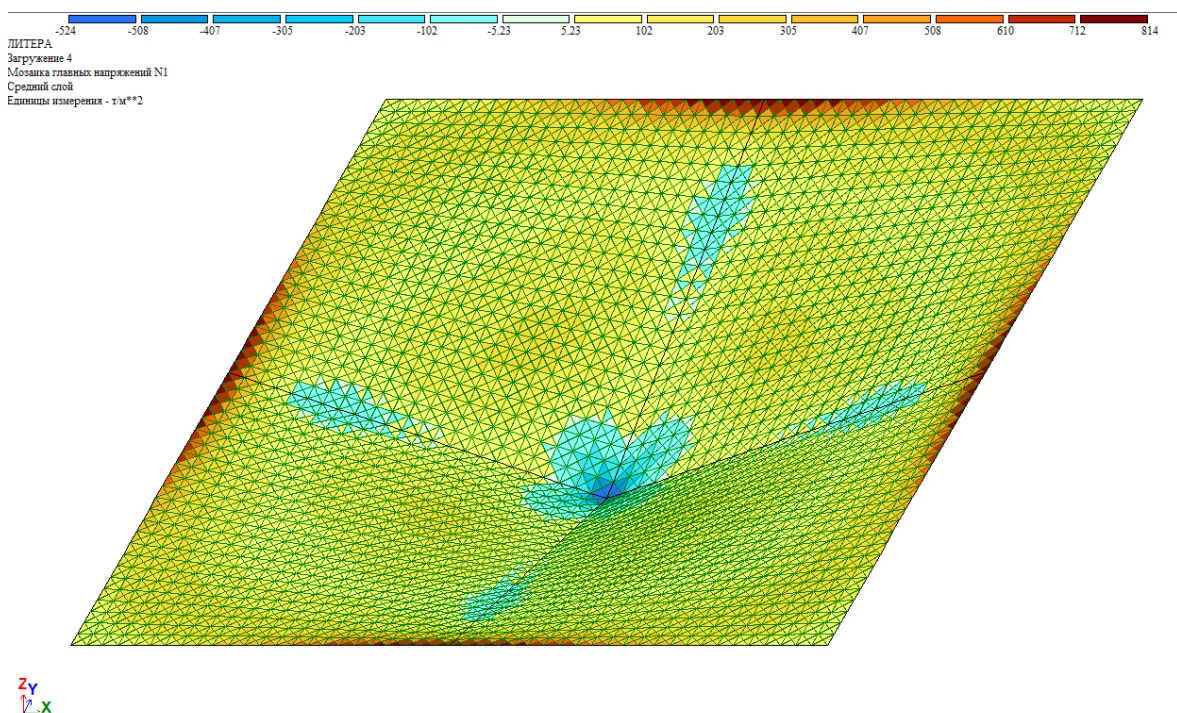
РОЗДІЛ 6

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОБОЛОНОК

6.1 Головні напруження в тонкостінній оболонці

Визначимо головні напруження стиску та розтягу від основного поєднання навантажень РСН 1 (власна вага конструкції+вага покрівлі+сніг на все поле оболонки).

Епюри ізополів головних напружень N_1 та N_3 наведено на рис.6.1–6.4



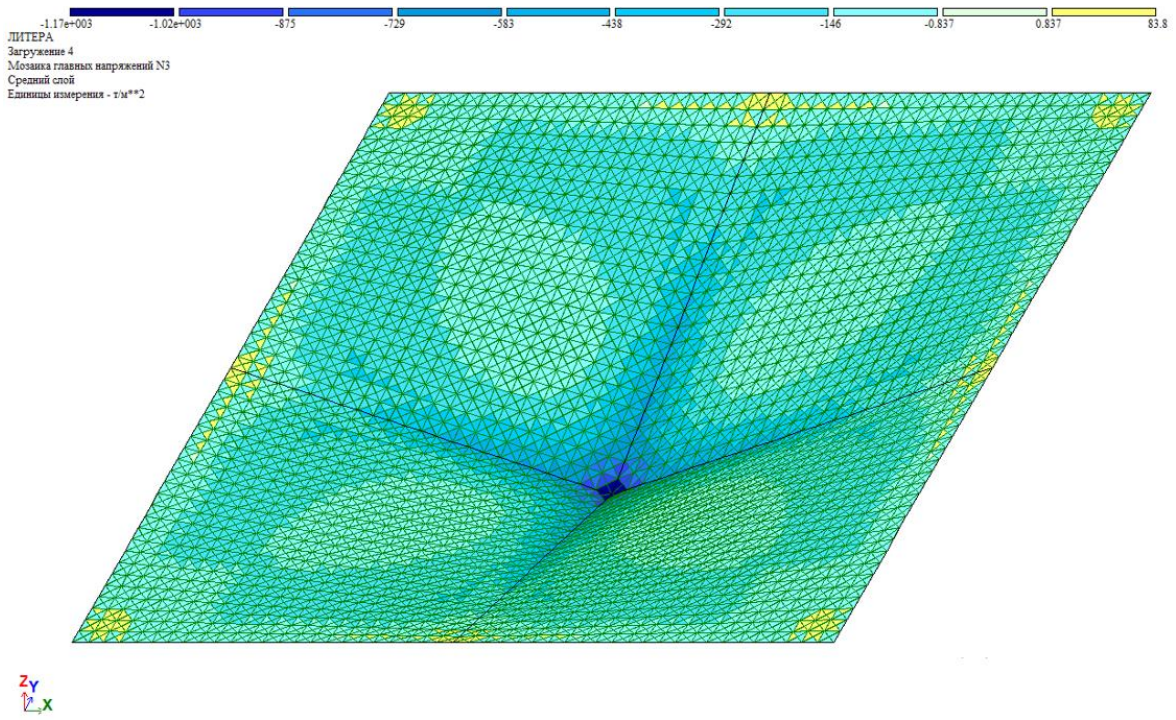
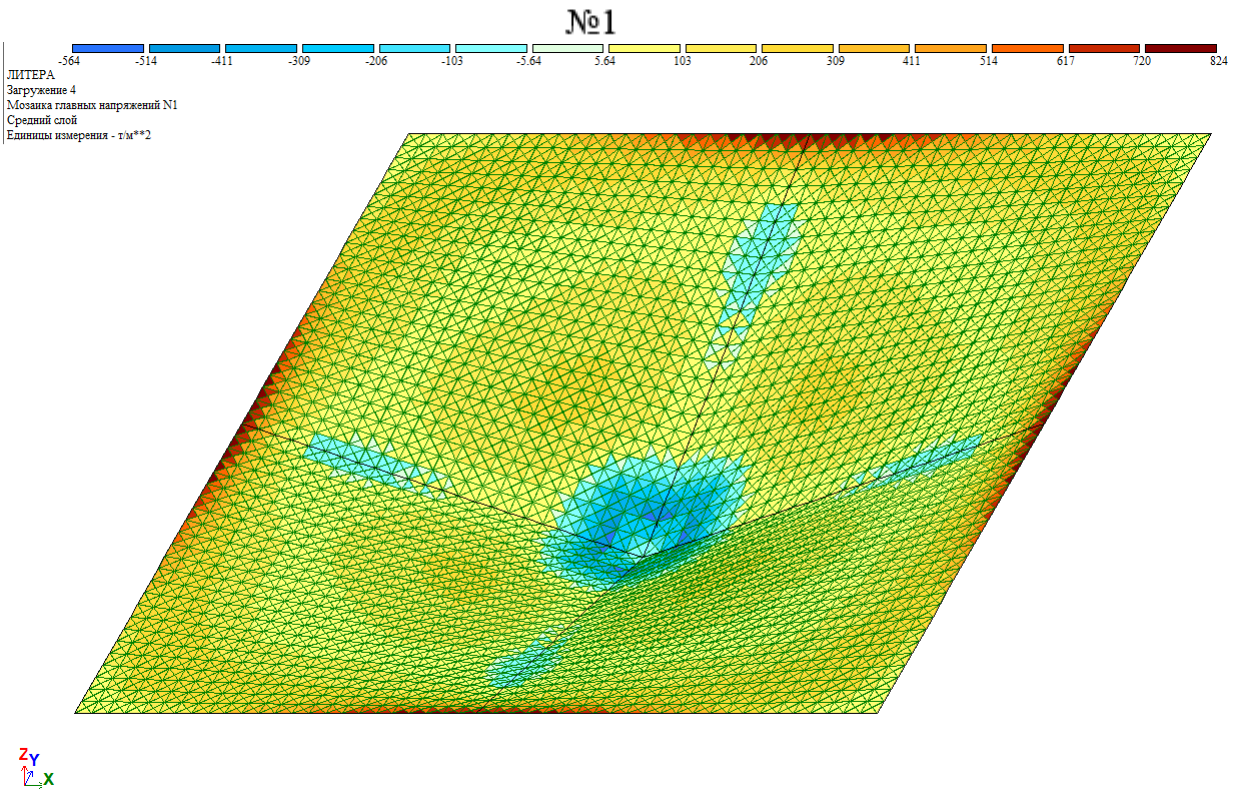


Рис. 6.1 Епюри головних напружень N1 (а) та N3 (б) для РСН1 для схеми



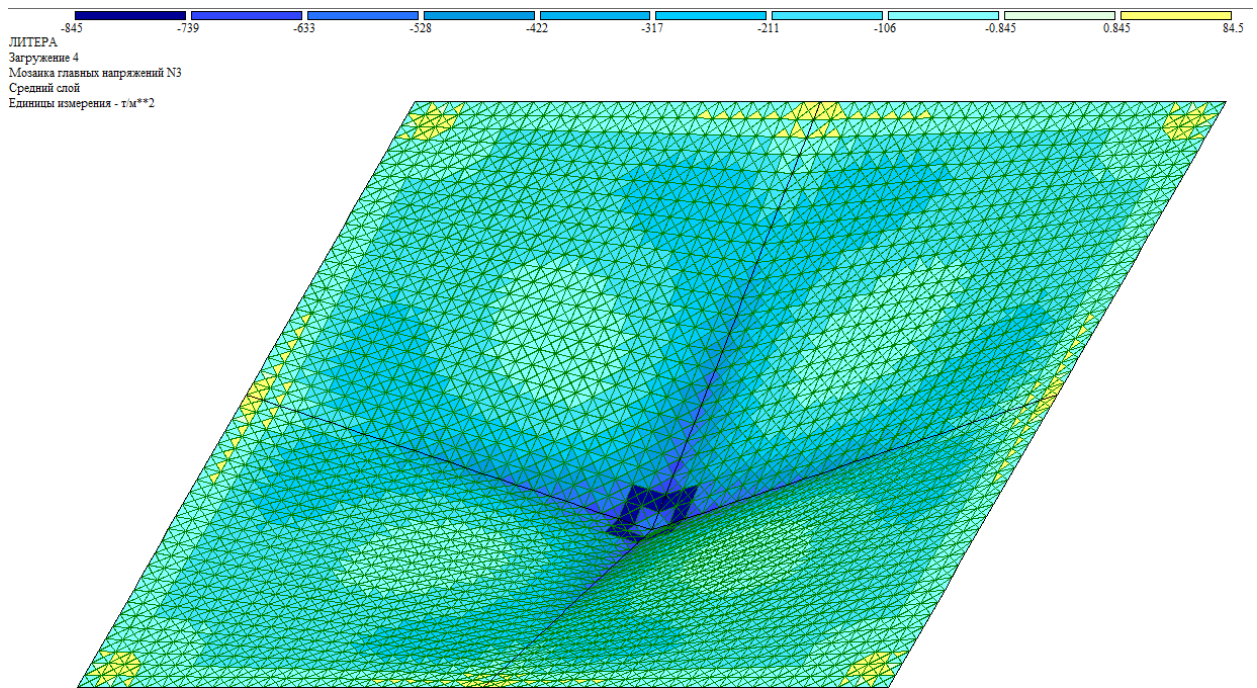
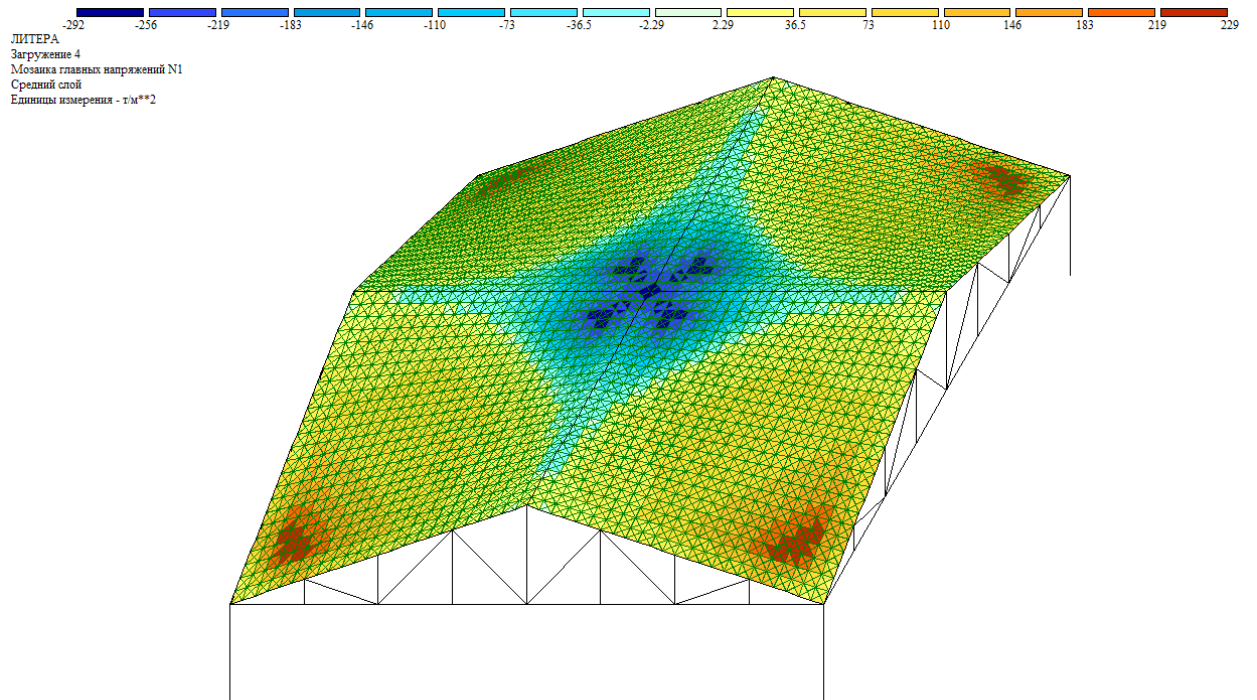


Рис.6.2 Епюри головних напружень N1 (а) та N3 (б)

для РСН1 для схеми №2



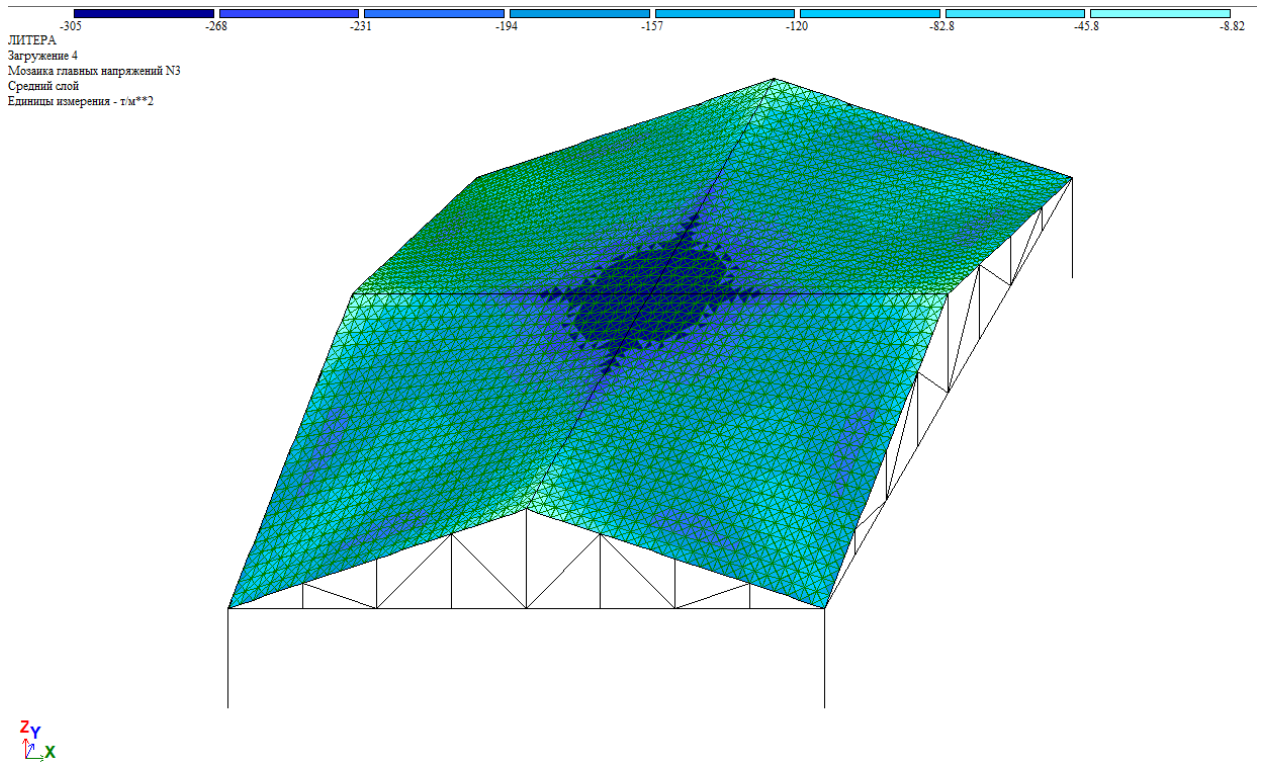
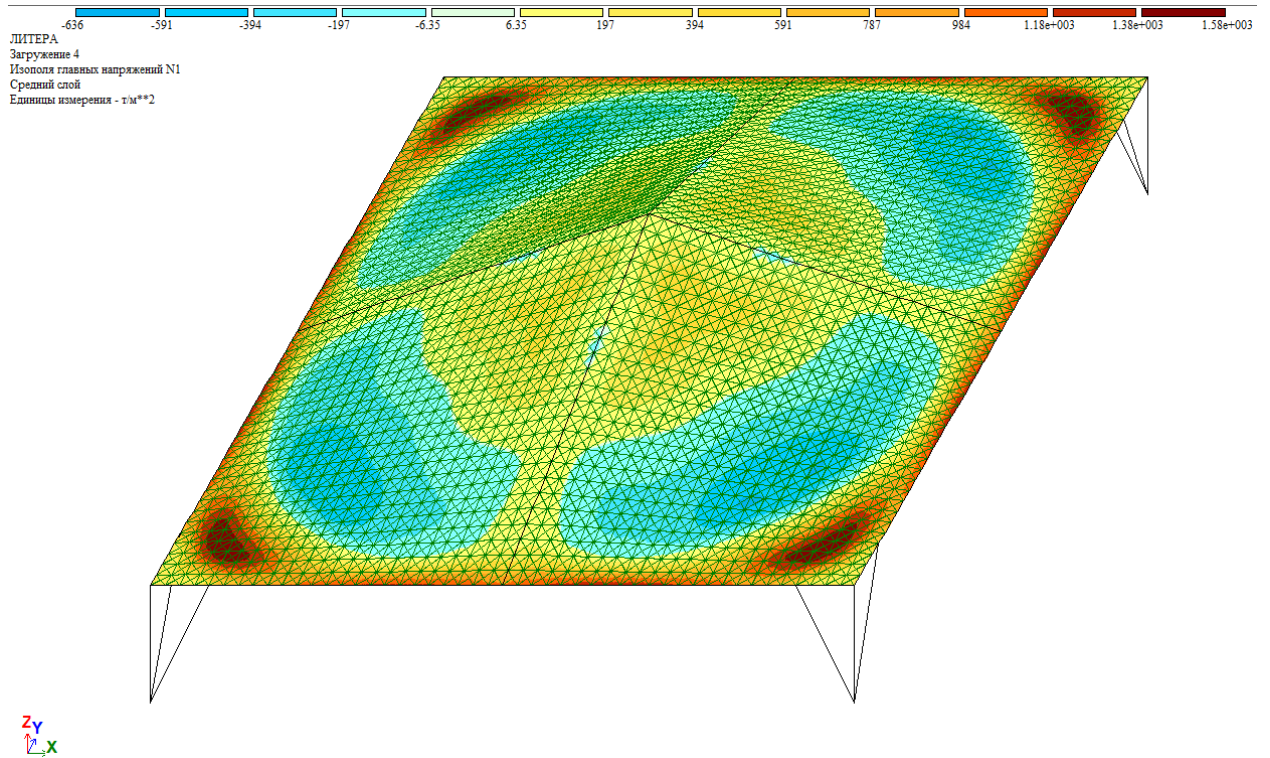


Рис. 6.3 Епюри головних напружень N1 (а) та N3 (б) для РСН1

для схеми №3



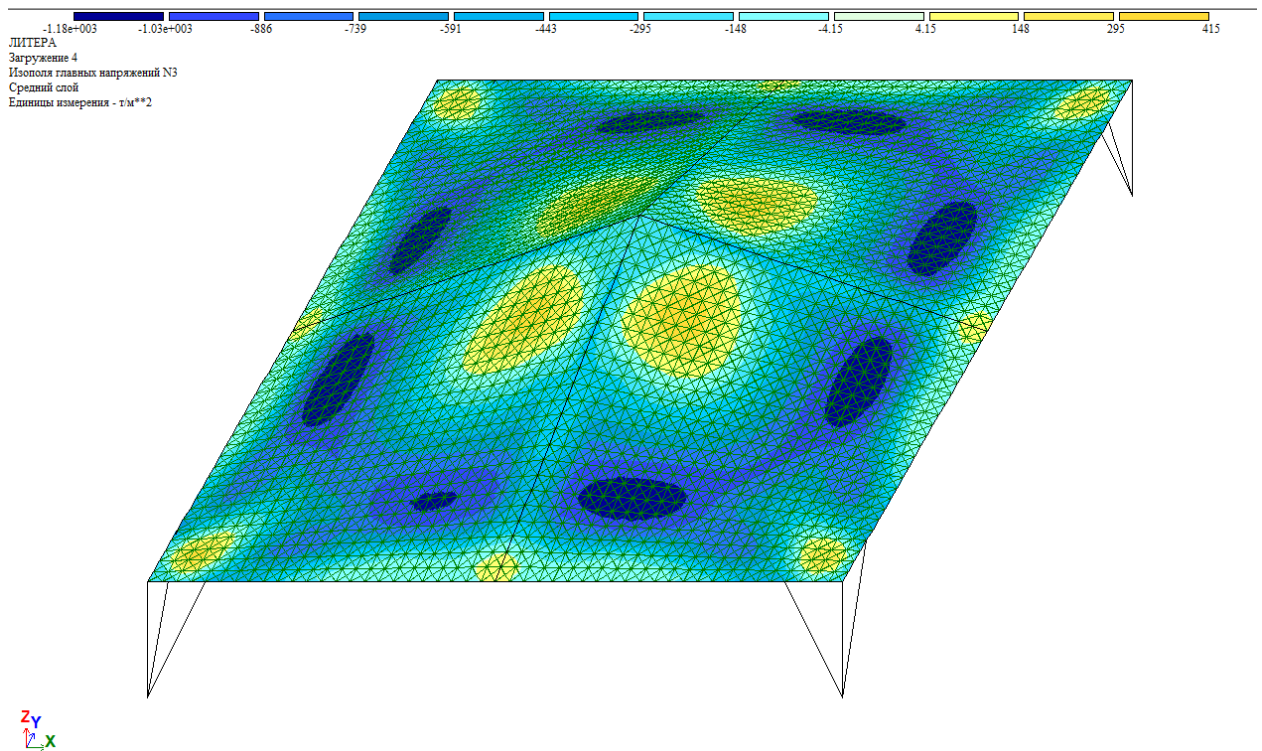


Рис.6.4 Епюри головних напружень N1 (а) та N3 (б) для РСН1 для схеми №4

Аналізуючи ізополя головних напружень можна зробити висновки, що найменші напруження, як стиску, так і розтягу, виникають в схемі №3. На рис. 6.5 наведено графік розподілу максимальних нормальних напружень для всіх схем оболонок.

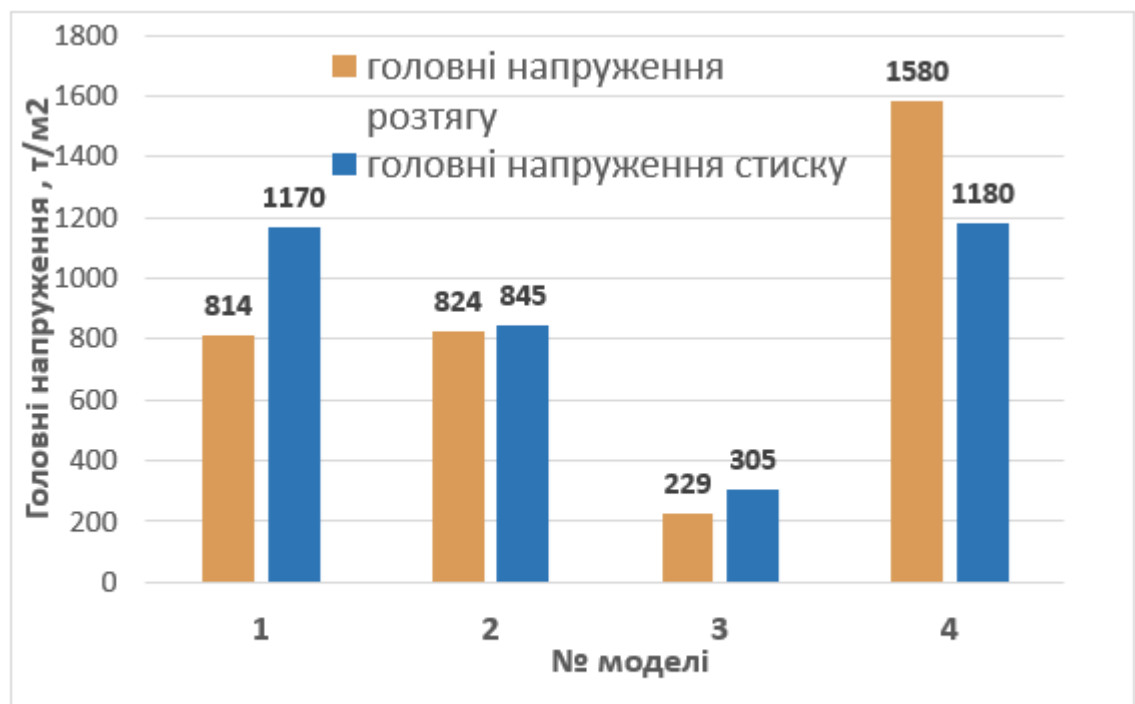


Рис.6.5 Максимальні головні напруження, що виникають в тонкостінній оболонці

Розподіл головних напружень розтягу (стиску) в діагональному перерізі $\frac{1}{4}$ оболонки (за рис.6.7) для всіх моделей оболонок наведено на рис. 6.6.

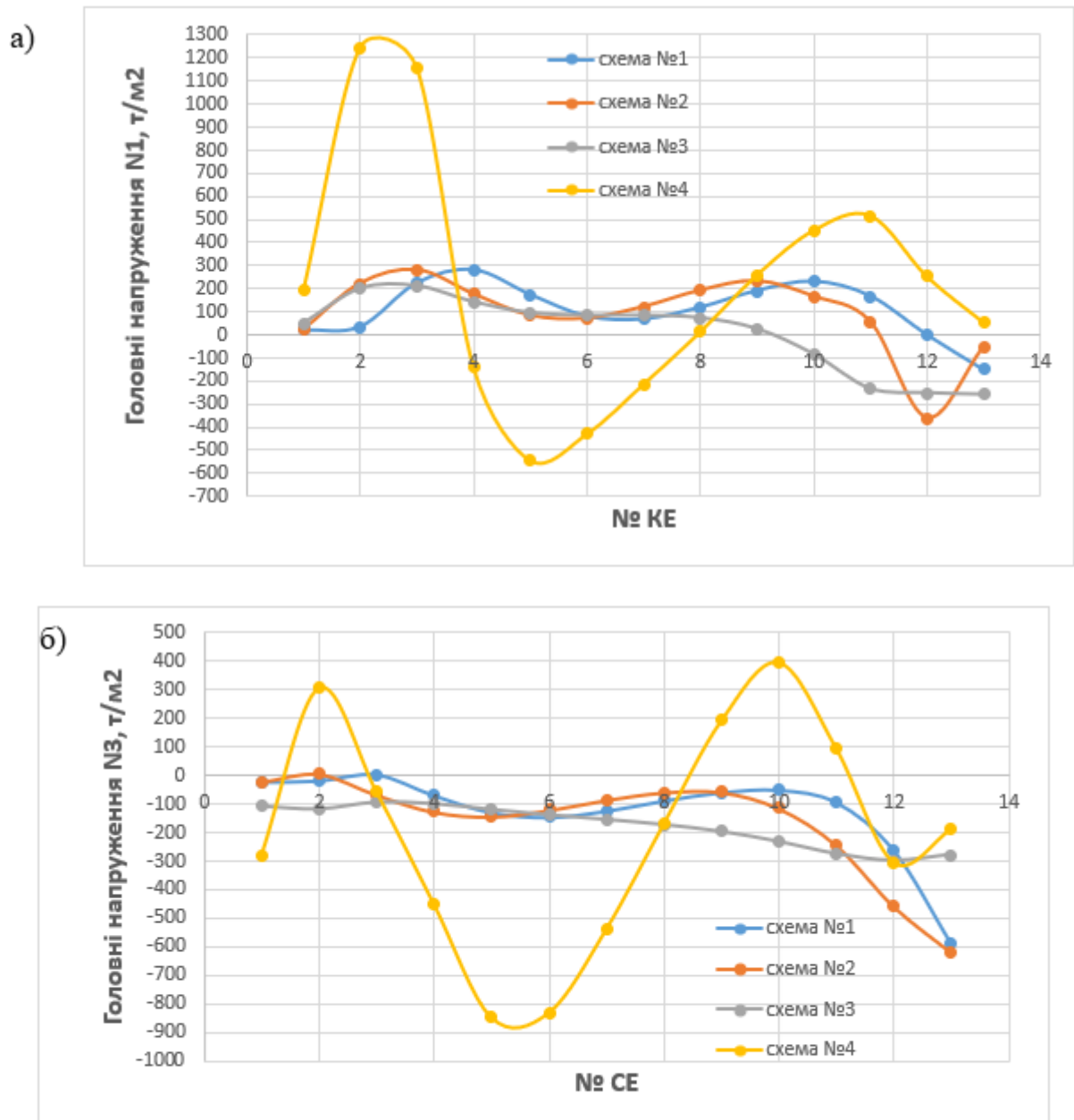


Рис. 6.6 Головні напруження N1 (а) та N3 (б) в діагональному перерізі $\frac{1}{4}$ поля оболонки

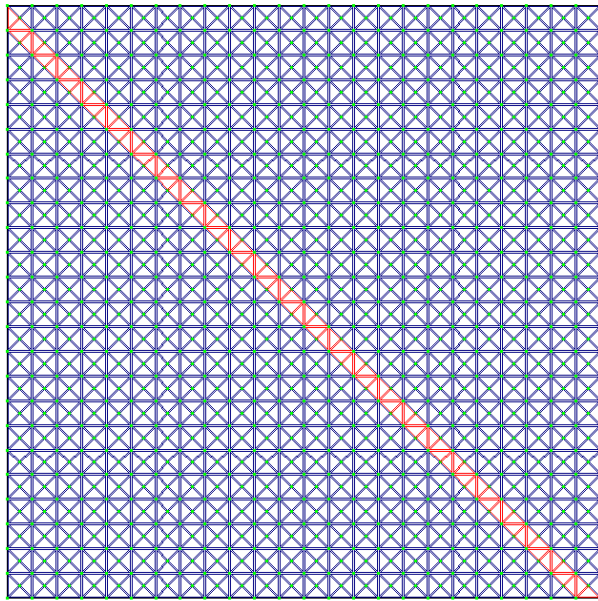


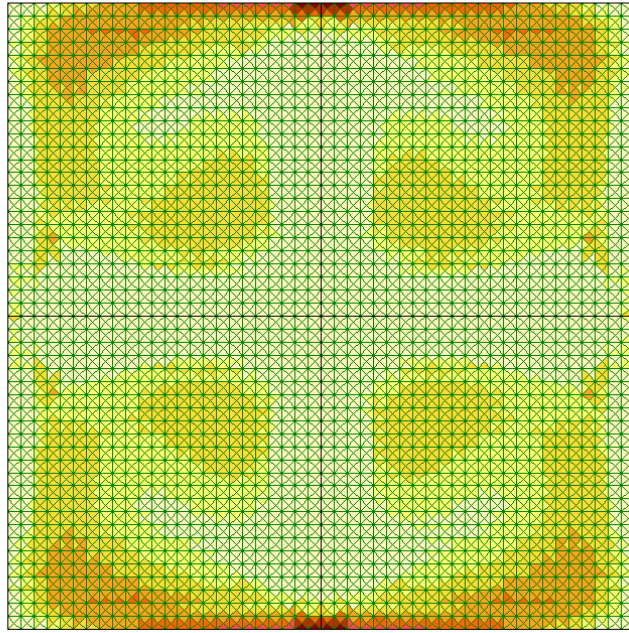
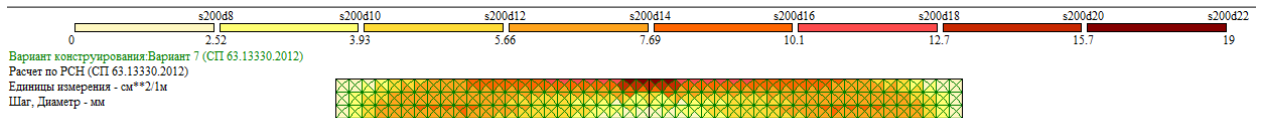
Рис.6.7 Переріз 1–1, в якому визначаються головні напруження (на $\frac{1}{4}$ частині конструкції)

6.2 Підбір армування поля оболонки

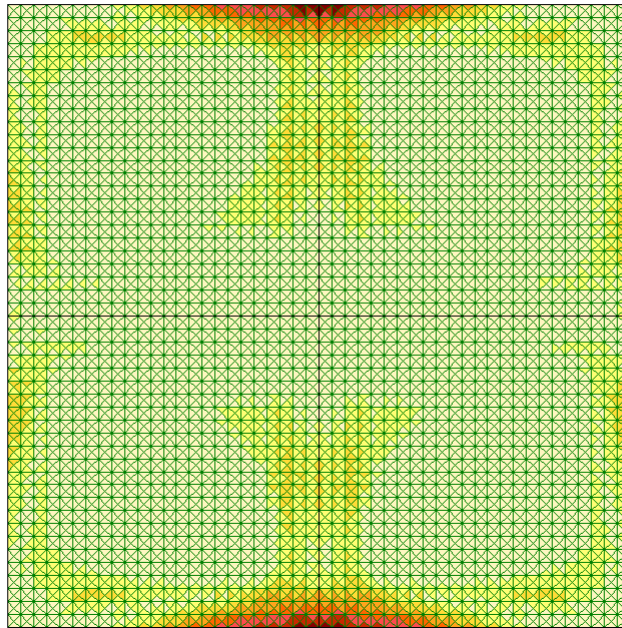
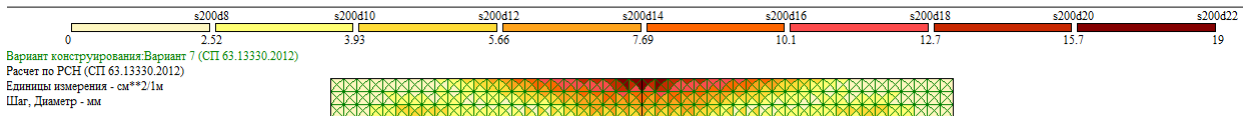
Як видно з графіків на рис. 6.5 та 6.6 головні напруження стиску не перевищують розрахункових опорів бетону на стиск $f_{cd}=14,5$ МПа ($1478,08$ т/м²), але головні напруження розтягу в декілька разів перевищують розрахунковий опір бетону на розтяг $f_{ctd}=1,0$ МПа ($101,9$ т/м²).

Тому за величинами головних напружень розтягу за нормами [2] з використанням модуля Ларм-САПР 2024 була підібрана робоча арматура для чотирьох моделей оболонок, що досліджуються.

Результати армування за головними напруженнями розтягу наведено на рис. 6.8 – 6.15.



▼



▼

Рис.6.8 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі Х для схеми №1

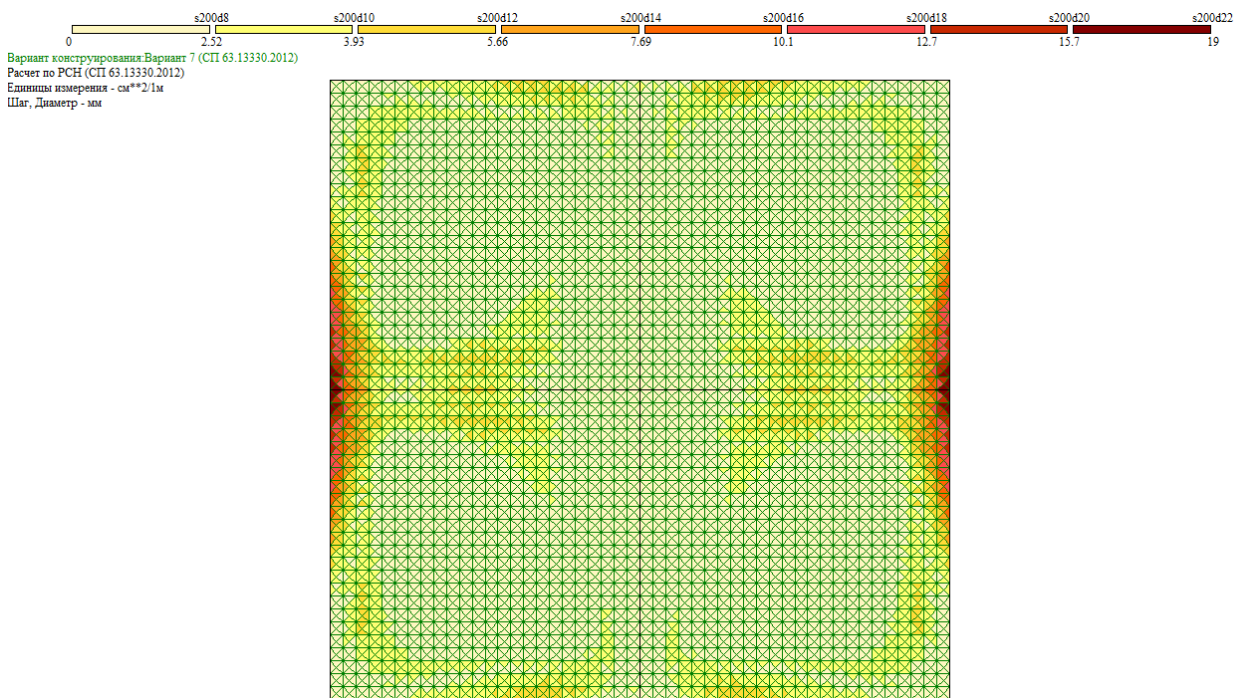
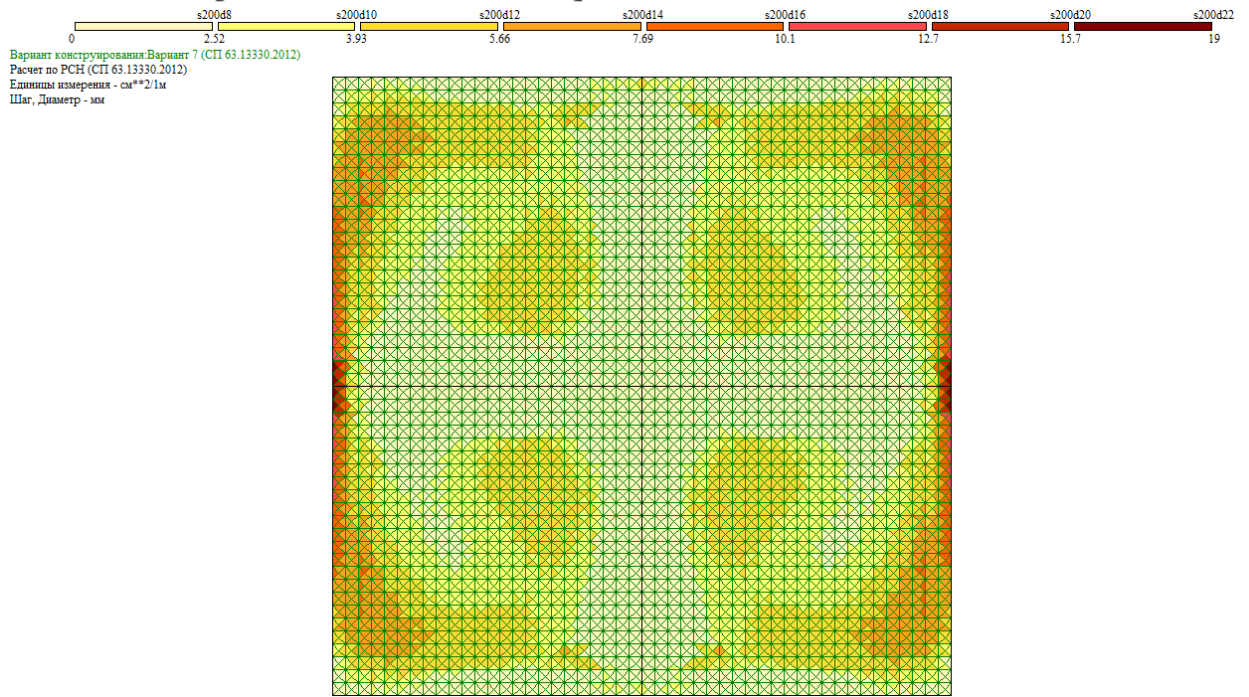


Рис. 6.9 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі У для схеми №1

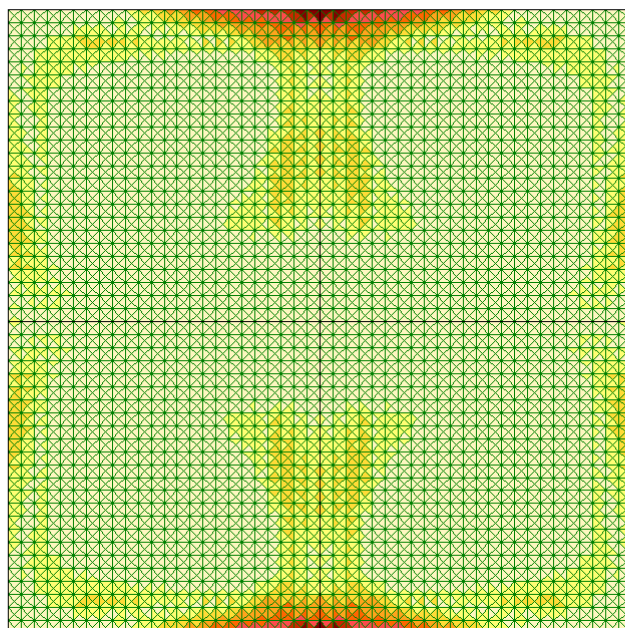
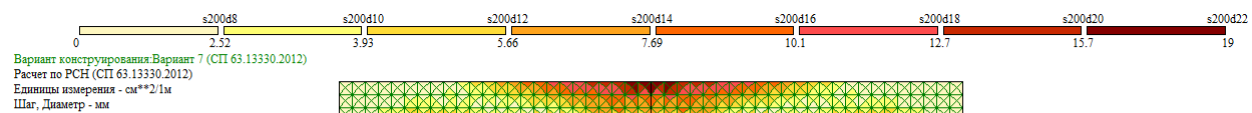
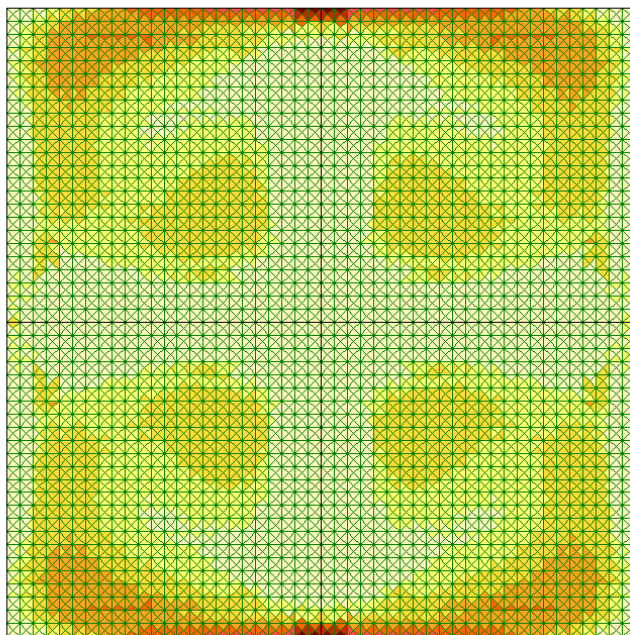
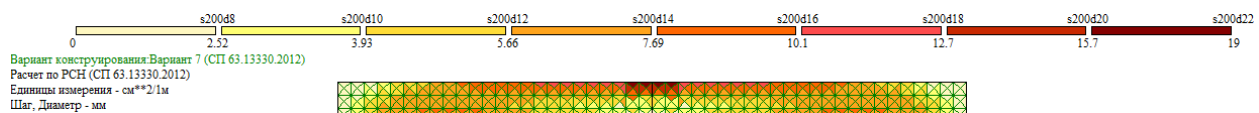


Рис.6.10 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі X для схеми №2

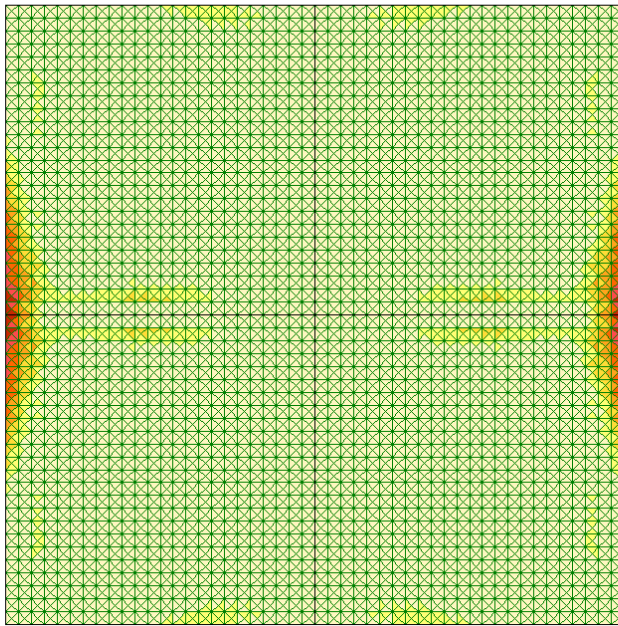
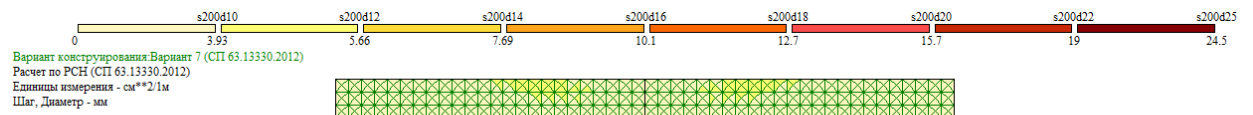
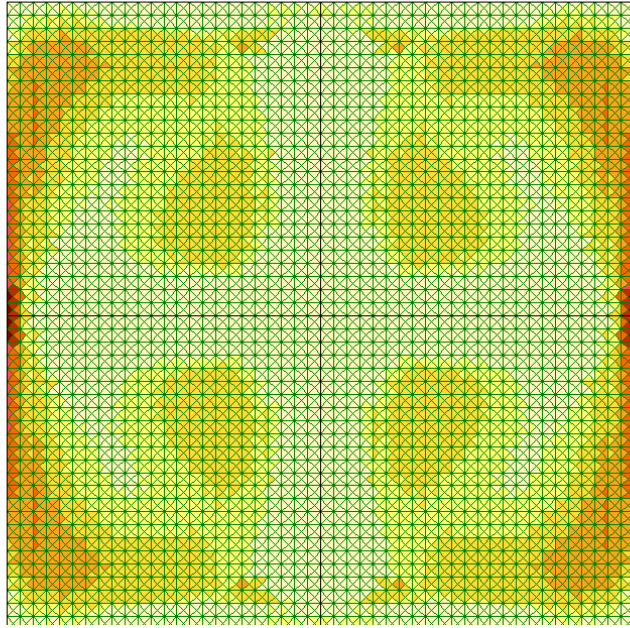
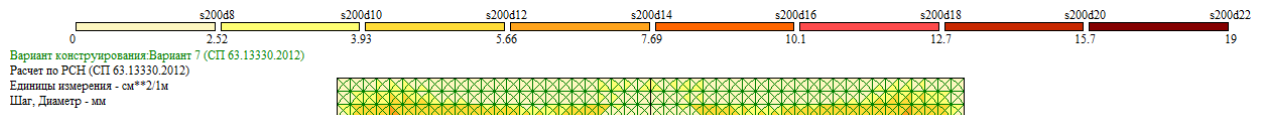


Рис.6.11 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі У для схеми №2

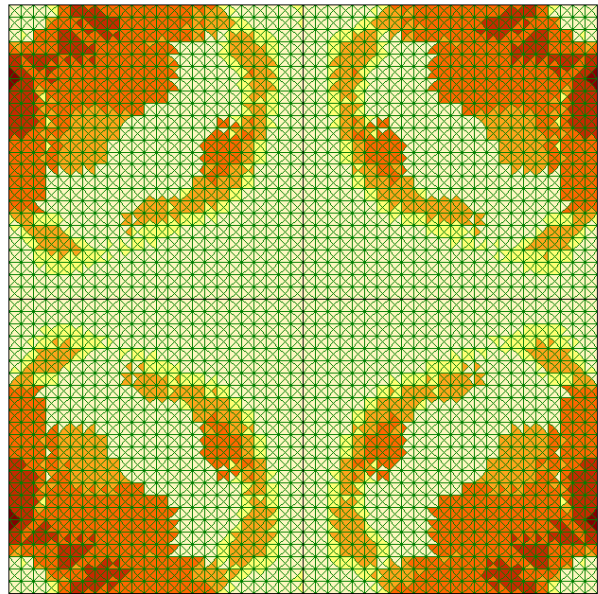
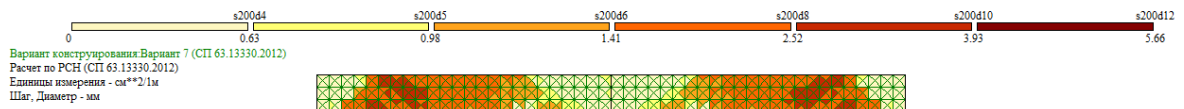
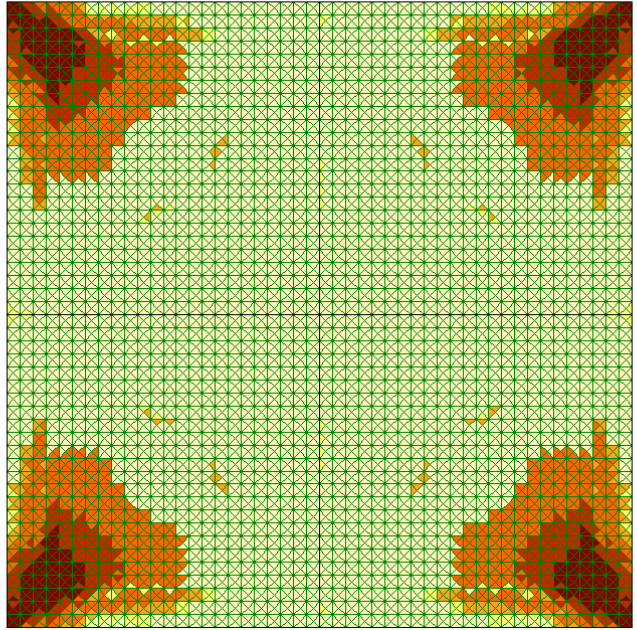
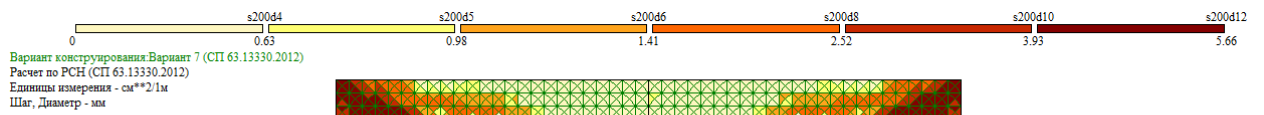


Рис.6.12 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі Х для схеми №3

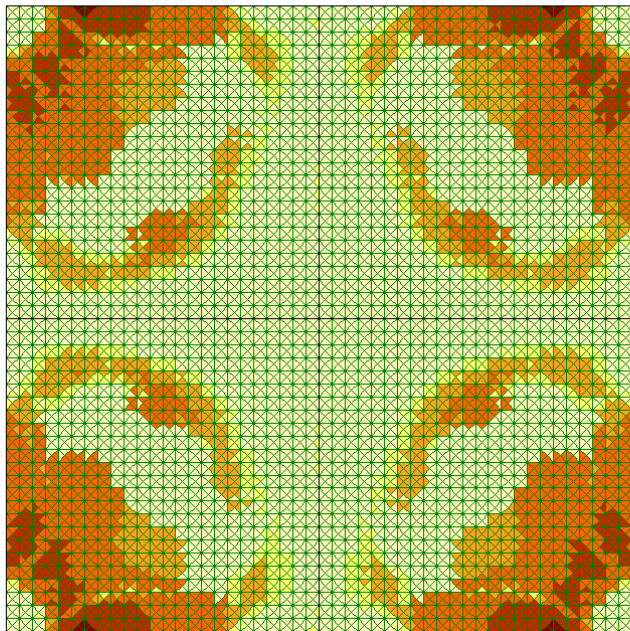
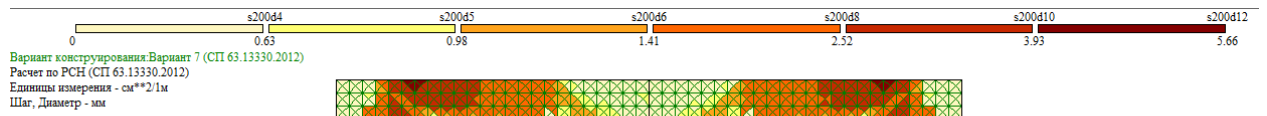
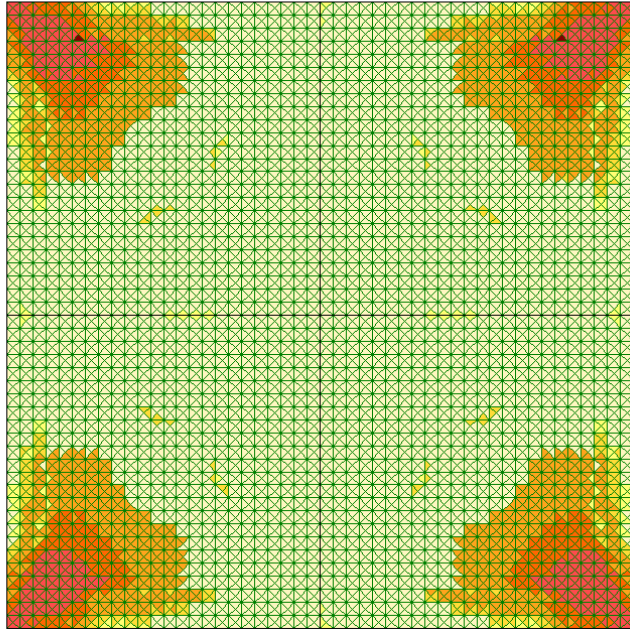
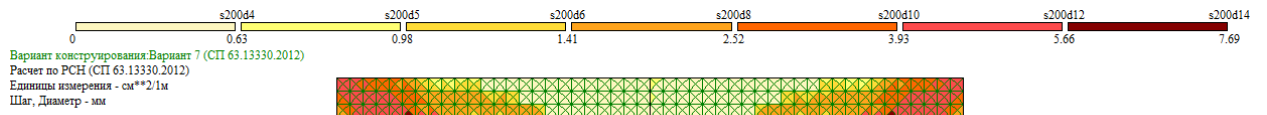


Рис.6.13 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі У для схеми №3

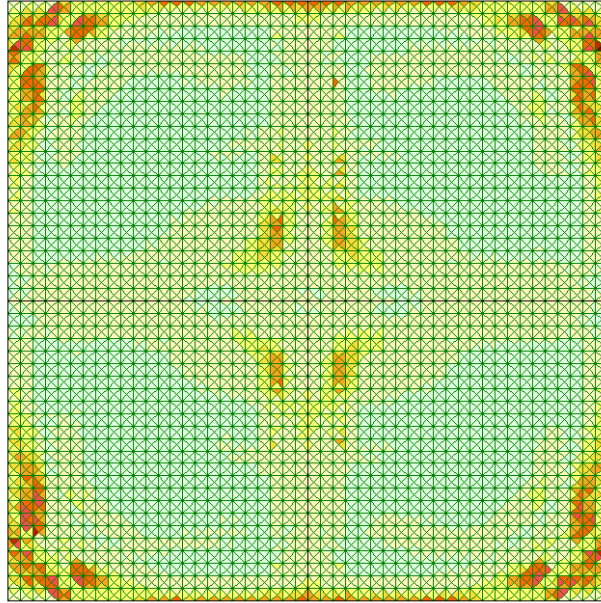
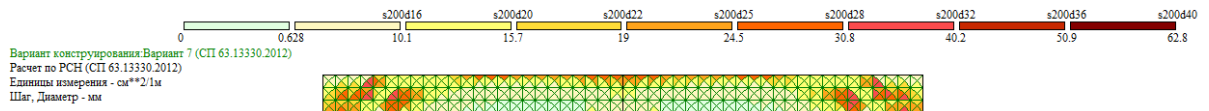
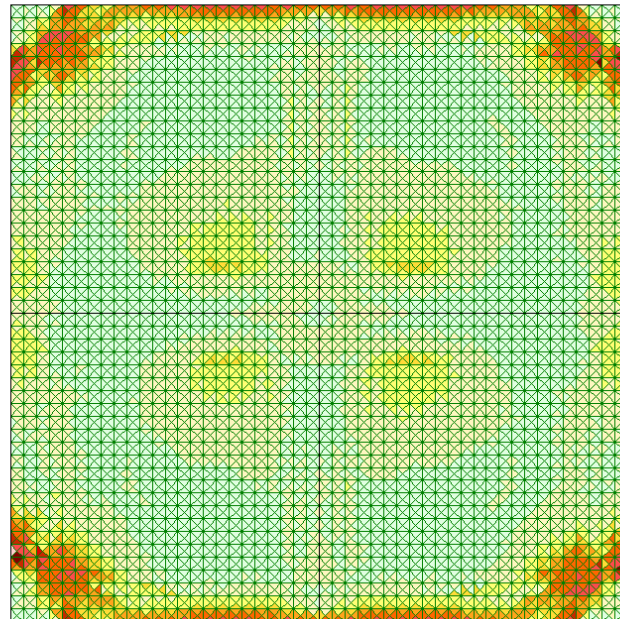
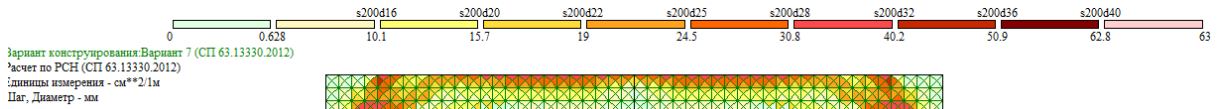


Рис. 6.14 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі X для схеми №4



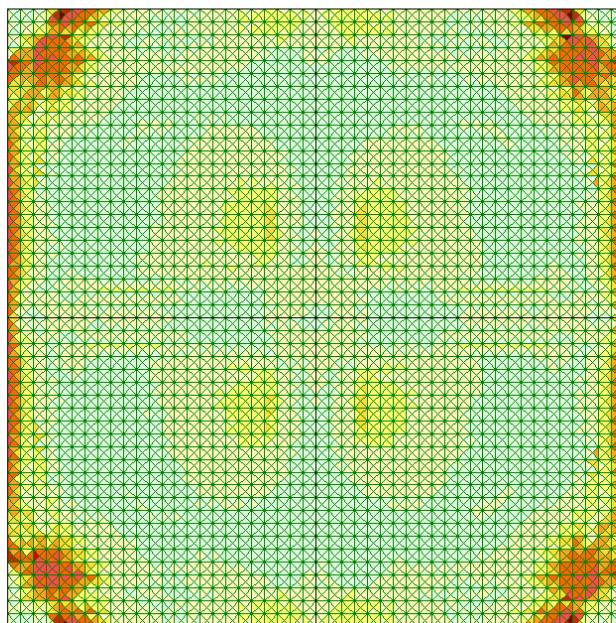
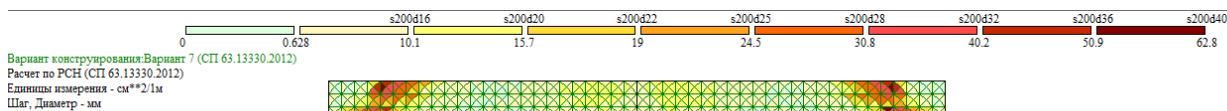
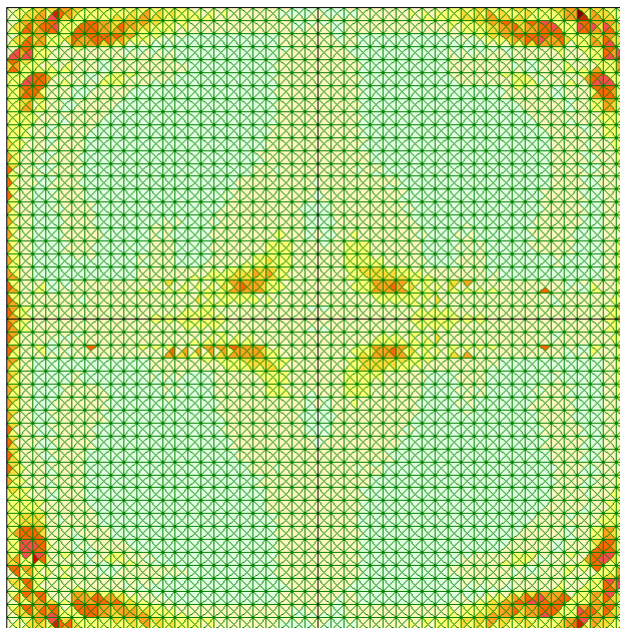
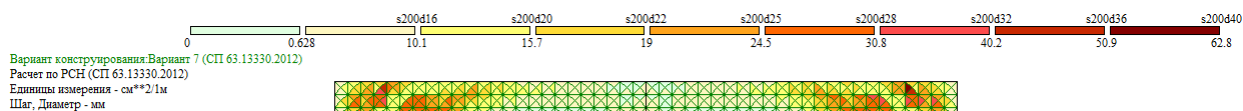


Рис.6.15 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі У для схеми №4

Максимальна площа армування нижньою та верхньою арматурою поля оболонки на 1 м.п. для розрахункових моделей наведена в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Максимальне армування

№ схеми	Армування вздовж осі X1, $\text{см}^2/\text{м.п.}$		Армування вздовж осі Y1, $\text{см}^2/\text{м.п.}$	
	Нижня арматура	Верхня арматура	Нижня арматура	Верхня арматура
1	19	19	19	19
2	19	19	19	24,5
3	5,6	5,66	7,69	5,66
4	62,8	63	62,8	62,8

Графічне зображення даних за табл. 6.1 наведено на рис. 6.16-6.17.

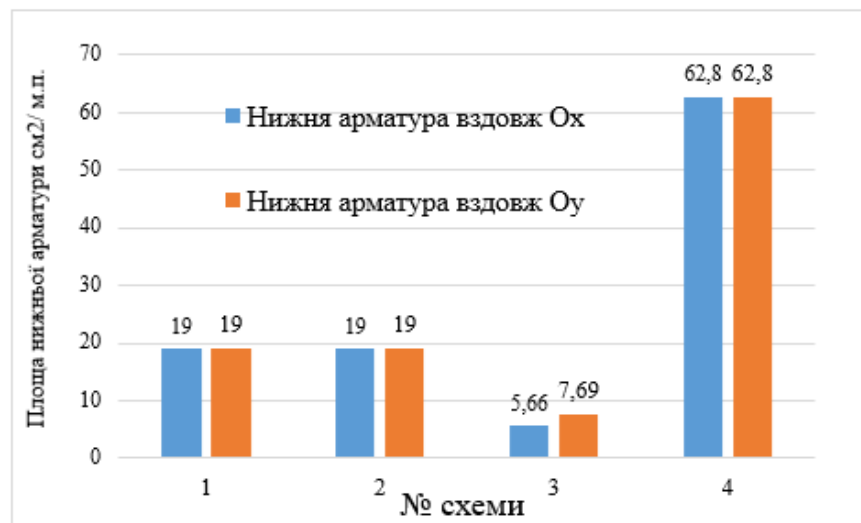


Рис.6.16 Максимальні значення площі нижньої арматури (см^2) на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості

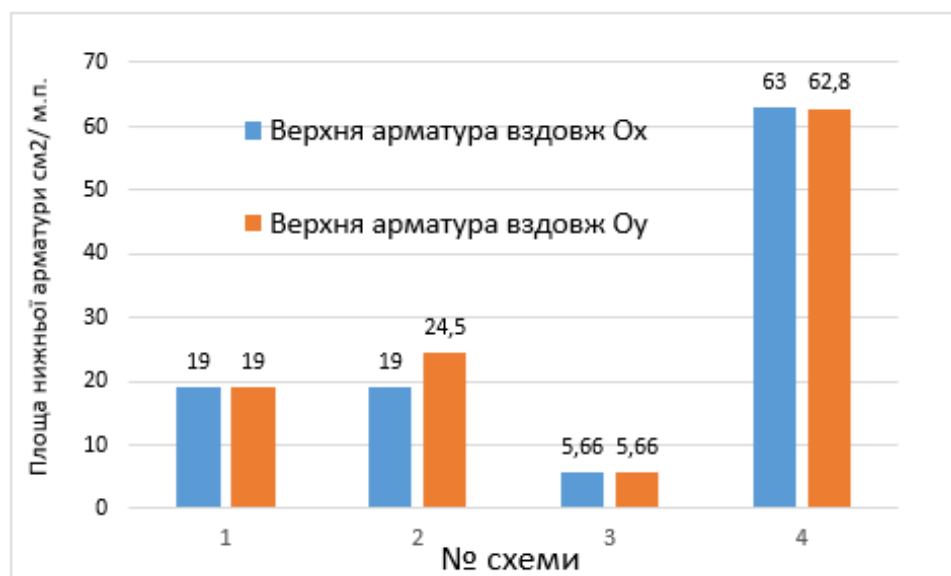


Рис.4.17 Максимальні значення площі верхньої арматури (см^2) на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості

Як видно із графіків на рис. 6.15–6.16 найбільших витрат арматурної сталі потребує оболонка за схемою №4, оскільки напруження розтягу в ній є максимальними й виникають за обома напрямками дії головних напружень N_1 та N_3 . Найменшої інтенсивності армування, а значить і витрат арматурної сталі, потребує оболонка за схемою №3. В цій оболонці за напрямками дії головних напружень N_3 розтягуючі напруження відсутні, в цьому напрямку оболонка працює лише на стиск.

6.3 Деформативність оболонок

На рис.6.18 – 6.21 наведено мозаїки переміщень вузлів оболонки вздовж осі Z.

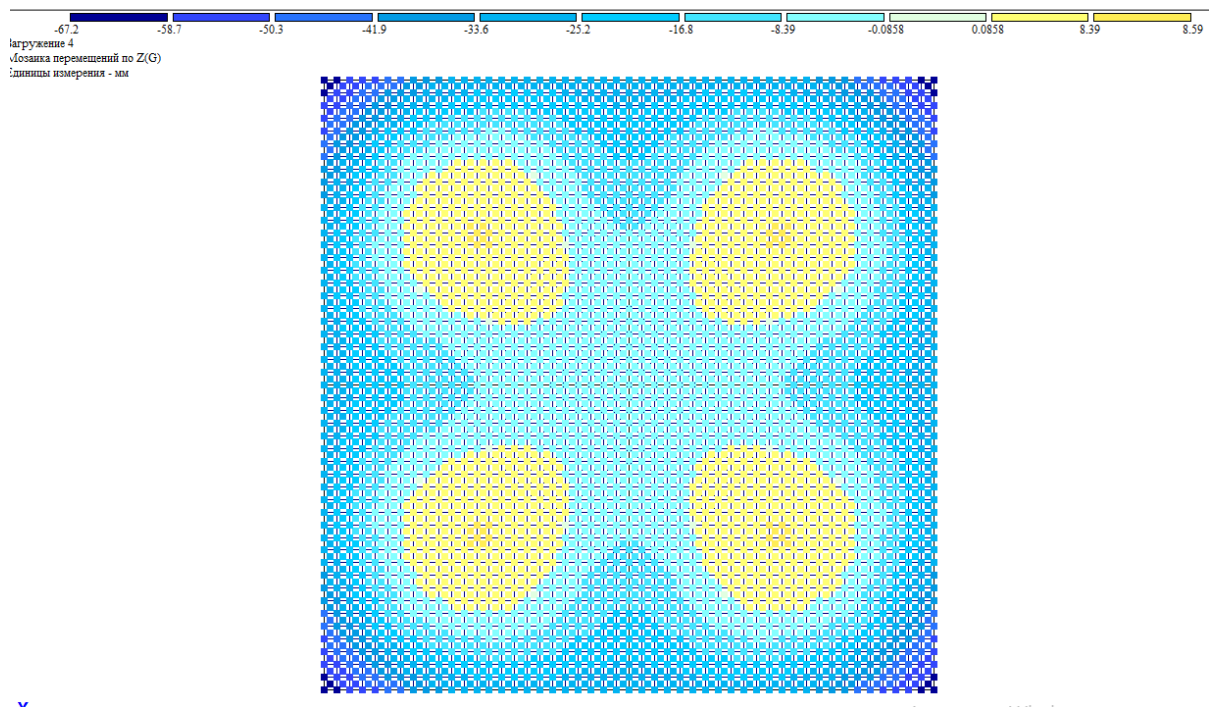


Рис.6.18 Мозаїка переміщень вздовж осі Z для схеми №1 ($Z_{\max}=67,2$ мм)

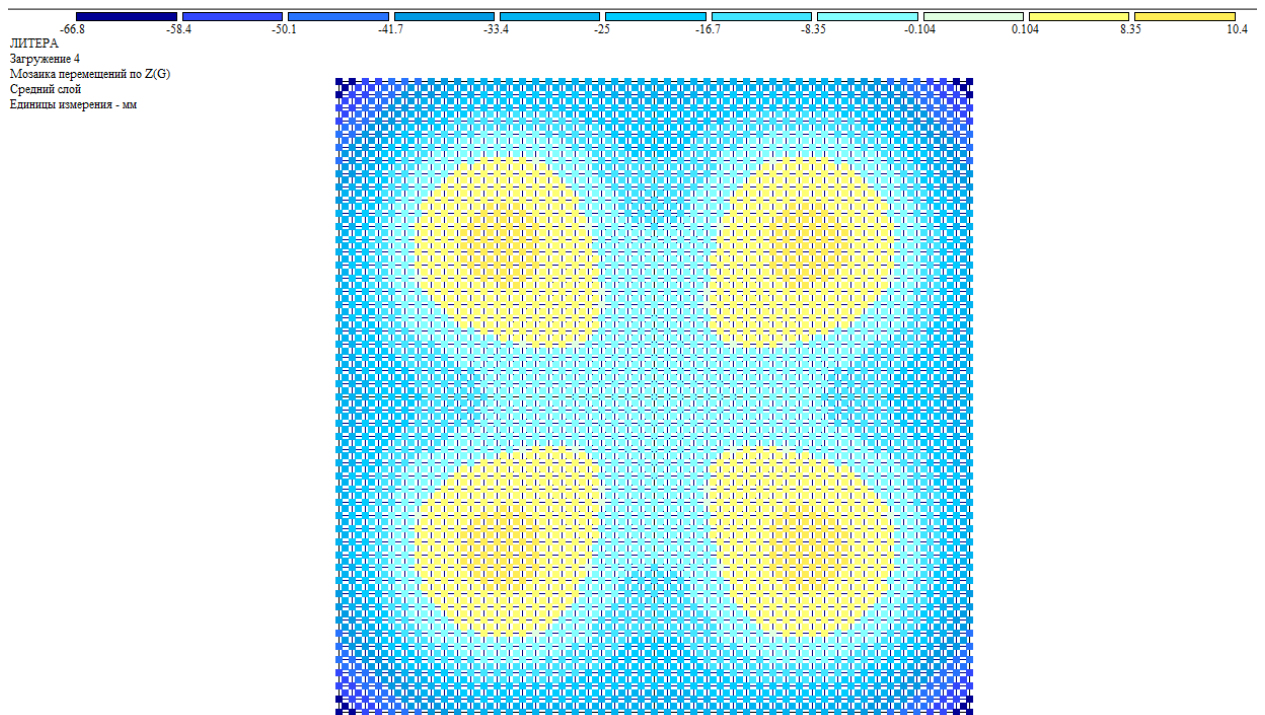


Рис. 6.19 Мозаика перемещень вздовж осі Z для схеми №2 ($Z_{\max}=66,8$ мм)

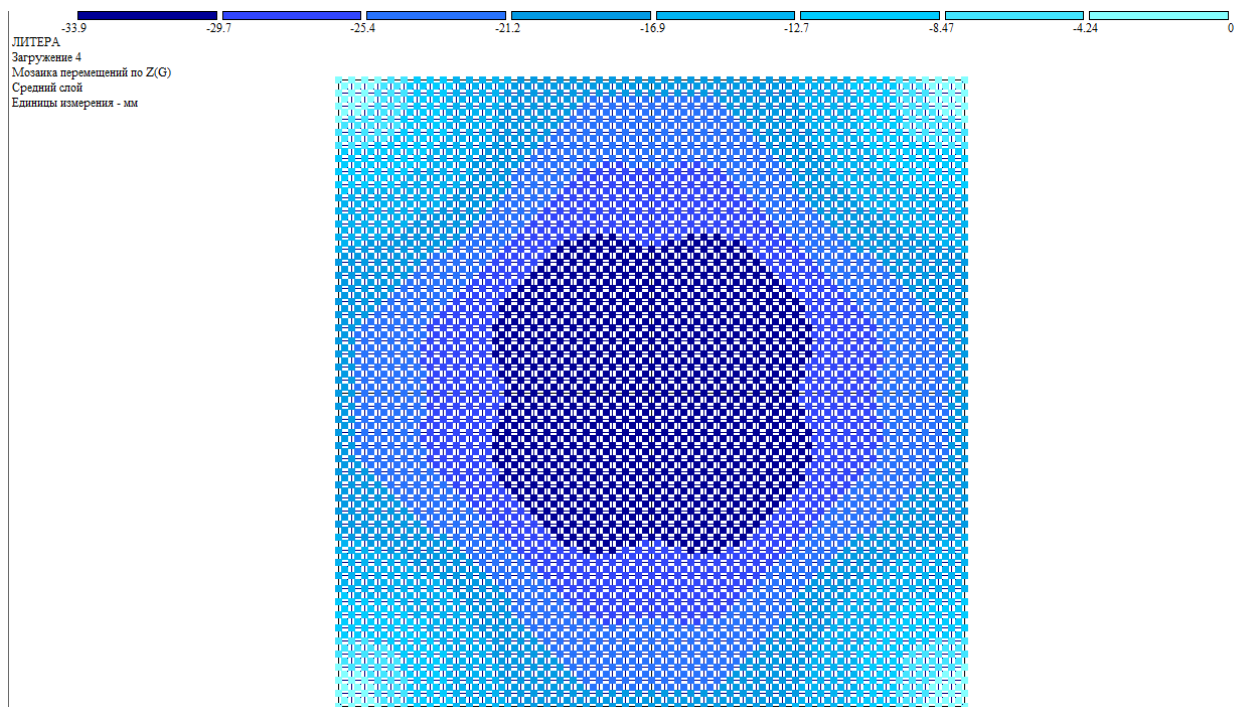


Рис. 6.20 Мозаика перемещень вздовж осі Z для схеми №3 ($Z_{\max}=33,9$ мм)

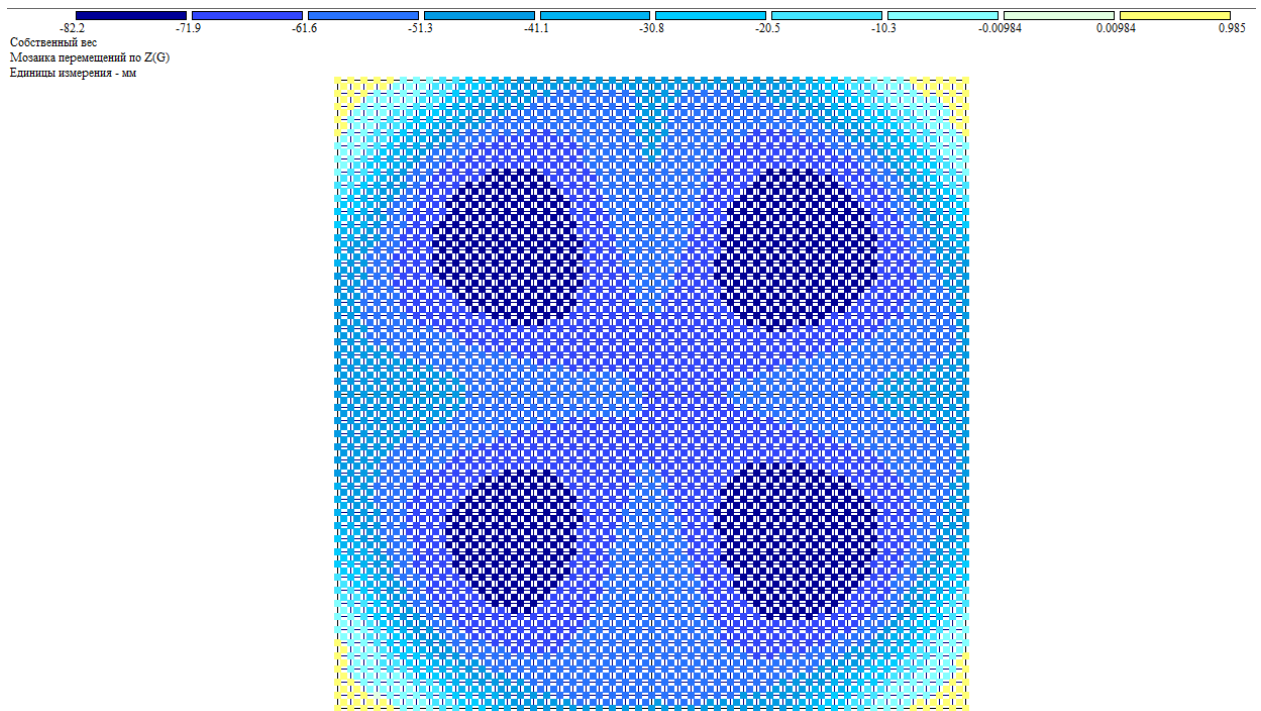


Рис. 6.21. Мозаїка переміщень вздовж осі Z для схеми №4 ($Z_{\max}=82,2$ мм)

На рис. 6.22 наведено максимальні значення переміщень вузлів конструкцій (зокрема вертикальних прогинів по осі Z).

За [4] обчислимо величину максимально допустимого прогину конструкції:

$$f_z = \frac{l}{300} = \frac{2400}{300} = 8,0 \text{ см}$$

де l – проліт оболонки.

В цілому всі величини максимальних вертикальних прогинів знаходяться в допустимих межах [4] для оболонок за схемами 1–3. Але, максимальне переміщення по вертикалі для схеми № 4 перевищує максимально допустиме в 2,0 рази (рис.6.22, в та 6.23).

Слід зазначити (рис.6.22 та рис.6.23), що для обох типів оболонок типу «гриб» вертикальні погини конструкції є майже однаковими, тобто наявність додаткових опорних колон ніяк не впливає на збільшення жорсткості конструкції в цілому.

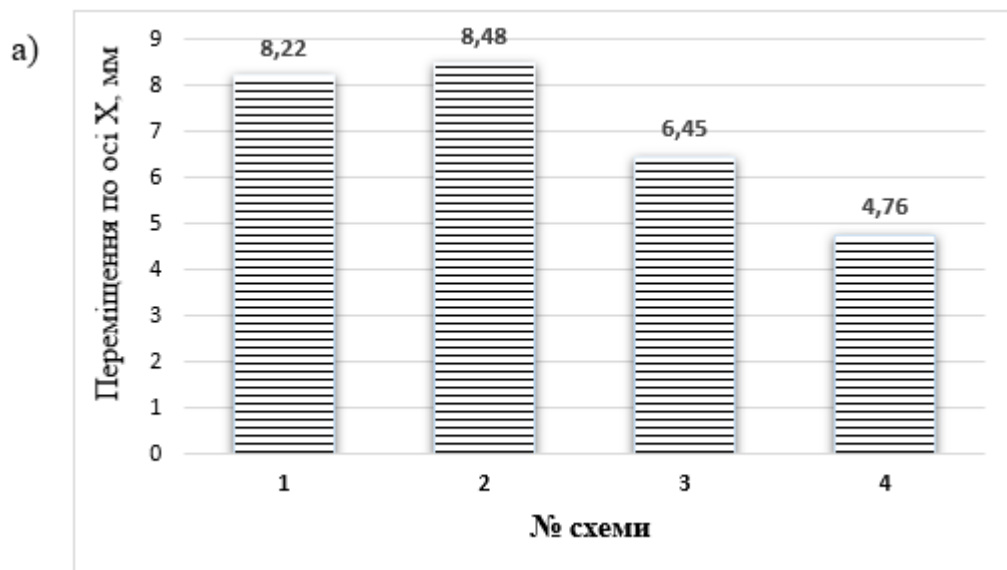
Найменші переміщення виникають в схемі №3, в гіпарі типу «шатер», що має торцеві діафрагми жорсткості у вигляді ферм із профілів типу «Молодечно». Найбільші вертикальні прогини мають місце в схемі №4 – схемі

шатрового типу, що спирається в кутах на стійки з підкосами. Але, очевидно, не підсилення країв конструкції значним чином збільшує деформативність оболонки типу «шатер з підкосами».

Таблиця 6.2 Максимальні переміщення вузлів схем (за рис. 6.18–6.21)

№ схеми	Переміщення вузлів розрахункових схем f , мм		
	вздовж O_x	вздовж O_y	вздовж O_z
1	8,22	8,22	67,2
2	8,48	8,35	66,8
3	6,45	6,45	33,9
4	4,77	5,09	82,2

На рис. 6.22 наведено максильні значення переміщень вузлів за даними мозаїк переміщень за рис.6.18–6.21.



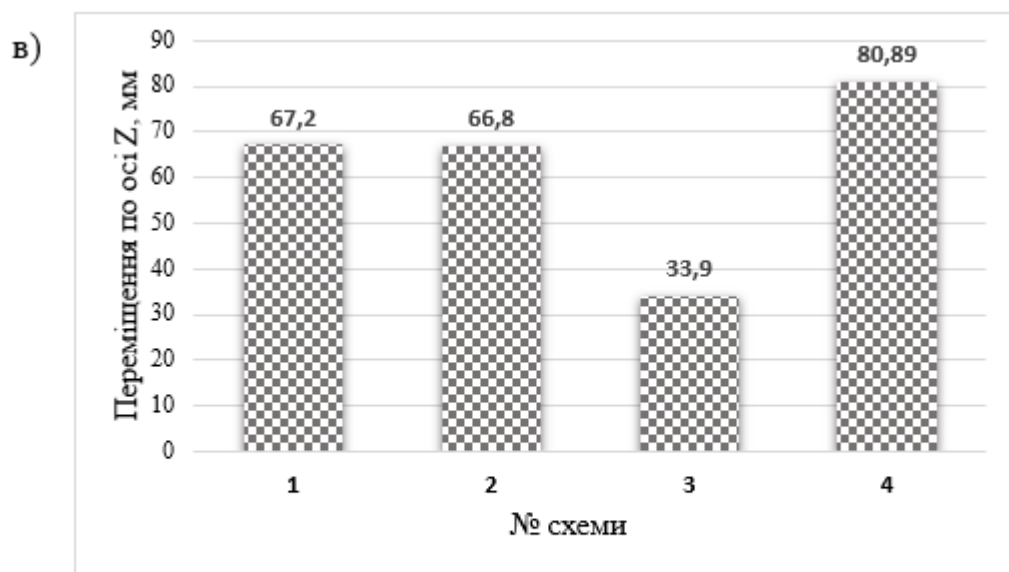
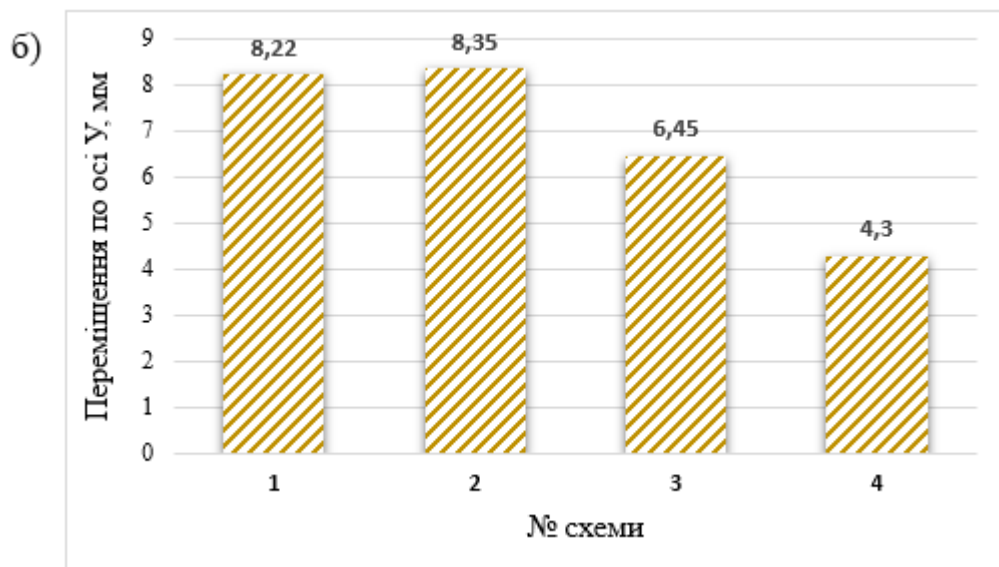


Рис. 6.22 Максимальні значення переміщень вузлів схеми: вздовж осі X – а;
вздовж осі Y – б; вздовж осі Z – в

На рис. 6.23 наведено графік вертикальних прогинів в діагональному перерізі на $\frac{1}{4}$ поля оболонки.

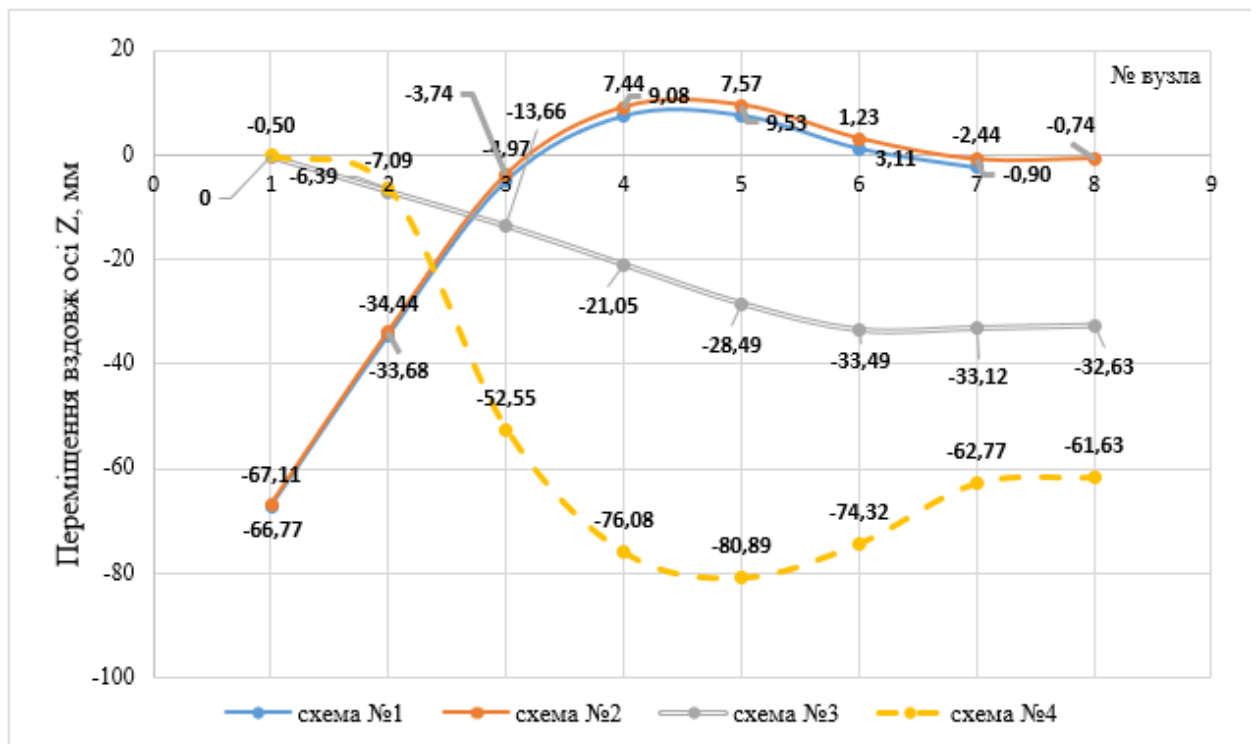


Рис.6.23 Переміщення вузлів вздовж осі Z (мм) на ¼ частині поля оболонки

Із рис. 6.23 видно, що найбільш менші та рівномірно розподілені вертикальні прогини притаманні оболонці за схемою №3, а найбільші прогини, що перевищують максимально допустимі в 2,0 рази виникають в оболонці за схемою №4.

РОЗДІЛ 7

ВИСНОВКИ

- 1.Складені на квадратному плані оболонки типу гіпарів з прямолінійними краями, що збігаються з твірними поверхні, є архітектурно виразними та ефективними з точки зору статичної роботи конструкціями.
2. Прийнято до аналізу чотири оболонки гіперболічного типу на квадратному плані 24,0x24,0 м за формою «гриб» та формою «шатер». Базова поверхня гіпар для всіх моделей є однаковою та описується формулою $Z = f \cdot x \cdot y / (\alpha \cdot b) = 4xy / (12^2) = xy / 36$. Лише з'єднання під різними кутами базового гіпару (що являє собою ¼ всієї поверхні оболонки) створює різні за характером роботи складені гіперболічні поверхні.

3. Опуклі твірні параболи оболонки працюють подібно аркам на стиск, а увігнуті зони – на розтягнення подібно гнучким ниткам, тому було перевірено стиснуті зони оболонки на стійкість. Перевірка стійкості оболонок типу «гриб» (схема №1 та №2) показала, що їх стійкість забезпечена. Перевірка стійкості оболонок типу «шатер» при мінімальній товщині стиснутої зони в 5 см виявилися не достатньо, але при збільшенні цієї товщини до 7 см умова стійкості виконалася.

4. За результатами статичного розрахунку від розрахункового сполучення навантажень (власна вага залізобетонної оболонки, покрівля, сніг на все поле) чотирьох моделей були отримані наступні висновки:

4.1 Головні напруження як стиску, так і розтягу, що обумовлюють конструктивне вирішення тонкостінної оболонки, розподілені по її полю плавно.

4.2 Головні напруження стиску для усіх моделей не перевищують розрахунковий опір бетону на стиск $f_{cd}=14,5$ МПа ($1478,08$ т/м²). Найбільші стискаючі головні напруження виникають за напрямком головних напружень N3 в схемах оболонок №1 («гриб») та №4 («шатер з підкосами») та дорівнюють відповідно 1170 т/м² та 1180 т/м². В оболонці за схемою № 2 («гриб з похилими стійками») максимальні напруження стиску є меншими в 2 рази за розрахунковий опір бетону на стиск.

4.3 У всіх розрахункових моделях, окрім моделі №3, за напрямком головних напружень розтягу N3 виникають розтягуючі напруження. За цим напрямком оболонка за схемою №3 є повністю стиснутою, головні напруження розтягу в ній відсутні.

Величини цих напружень розтягу не перевищують допустимого розрахункового опору бетону класу C 20/25 на розтяг $f_{ctd}=1,0$ МПа= $101,9$ т/м² для оболонок за схемами №1 та №2, але для оболонки за схемою №4 вони становлять 415 т/м² та перевищують опір бетону на розтяг в 4 рази.

4.4 За напрямком головних напружень N_1 всі оболонки зазнають напружень розтягу, які перевищують в декілька разів розрахунковий опір

бетону на розтяг. Так для схем №1 та №2 ці напруження перевищують опір бетону на розтяг у 8 разів, а для схеми №4-в 15,8 раза. Найменші напруження розтягу виникають в оболонці №3, де таке перевищення складає 2,3 раза.

4.5 Отже, проаналізувавши величини головних напружень розтягу та стиску, можна зробити висновок, що найбільш раціональною з точки зору виникнення та розподілу головних напружень розтягу є оболонка за схемою №3. Очевидно, що наявність торцевих діафрагм жорсткості у вигляді сталевих ферм значним чином зменшує в тілі оболонки як напруження стиску, так, що головне, і напруження розтягу. Найменші за модулем і такі, що діють лише за одним напрямком головних напружень, напруження розтягу дозволяють суттєво зекономити арматуру при армуванні поля оболонки.

5. За величинами головних напружень розтягу за нормами [2] з використанням модуля Ларм-САПР 2024 були обчислені площі нижньої та верхньої арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості

5.1 Як по осі X , так і по осі Y площі нижньої та верхньої арматури на 1 м.п. для схем №1 та №2 є однаковими та максимальне їх значення становить $19 \text{ см}^2/\text{м.п.}$ Для схеми №3 такі максимальні значення площі арматури є найменшими та становлять $5,66\text{--}7,7 \text{ см}^2/\text{м.п.}$

Найбільші максимальні значення площі верхньої та нижньої арматури за напрямками X та Y мають місце для схеми № 4 та становлять $63 \text{ см}^2/\text{м.п.}$

Такі дані щодо витрат арматури вказують на шатрову оболонку за схемою №3 як на найбільш ефективну.

6. Деформативність у вертикальному напрямку для оболонок за схемами №№1–3 є в допустимих межах та не перевищує гранично допустимого значення, а для схеми №4 максимальний прогин від навантаження є в 2 рази більшим за гранично допустимий.

7. За критерієм найменших головних напружень, найменших вертикальних прогинів та найменших витрат арматурної сталі найбільш ефективним є гіперболічний параболоїд шатрового типу (схема №3), а

найбільш не раціональною з точки зору роботи та конструювання є поверхня оболонки за схемою № 4- шатер з підкосами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пасічник Руслан Володимирович. АВТОРЕФЕРАТ дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Скінченнорізницева методика розрахунку стійкості оболонок з від'ємною гаусовою кривою. ЛУЦЬК-2010
2. Державні будівельні норми України. Конструкції будинків і споруд. БЕТОННІ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННІ КОНСТРУКЦІЇ. Основні положення. ДБН В.2.6-98:2009. Київ, Мінрегіонбуд України. 2011
3. Azizov T.N. Аналіз напружено-деформованого стану купольного покриття / T.N. Azizov, N.M. Sribnyak, A.O. Vavulin // ACADEMIC JOURNAL Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Полтава: ПНТУ, 2017. – Т. 1 (40). – С. 120-128. – Режим доступу: <http://journals.pntu.edu.ua/znp/article/view/230> (дата звернення: 18.11.2018).
4. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. ПРОГИНИ І ПЕРЕМІЩЕННЯ Вимоги проектування
5. G. Rühle Raumabdeckungen (Konstruktionen und Bauweisen). Band I. Stahlbeton, Stahlzement. 1973.
6. Spartali, Homam & Hegger, Josef & Chudoba, Rostislav. (2023). Structural behaviour of origami-based folded shells made of carbon textile reinforced concrete. 10.18154/RWTH-2023-06682.
7. Gupta A R, Deshmukh S K, Metkar S R 2012 Finite Element Method Analysis and Design for Pre-stressed Shell Type Structure Innovative Approaches in Civil Engineering National Multi-Conference March 7-8 15-18.
8. Vijayalaxmi Kedilaya B, Prasanth S, Hegde A 2018 Structural stability of large spanfree form Shell structure by finite element IJCET 9(6) 287-293.
9. Harish B A, Ramana N V, Manjunatha K 2015 Finite Element Analysis of Doubly Curved Thin Concrete International Journal of Engineering Science and Innovative Technology 4 (5) 48-57.

10. Shimoda M., Iwasa K., Tsukada S 2010 Optimal Shape Design of Shell Structures 4th European Conference on Computational Mechanics Paris France May 16-21 1-2
11. Gulzar H. Barbhuiya, Syed Danish Hasan, Mohammed Harun Al-Rashid. Analysis and Design of Reinforced Concrete Thin Cylindrical Shell. 2021, Journal of Physics: Conference Series
12. Alexander Scholzen, Rostislav Chudoba, Josef Hegger. Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete - Part I: Structural design and construction. Structural Concrete, March 2015, n. 1, v. 16. P. 106-114. DOI: 10.1002/suco.201300071
13. Gergely, Peter; Banavalkar, P. V.; and Parker, J. E., "The analysis and behavior of thin-steel hyperbolic paraboloid shells" (1971). Center for Cold-Formed Steel Structures Library. 160. <https://scholarsmine.mst.edu/ccfss-library/160>
14. Thomas Henriksen Stephen Lo Stephen Lo Ulrich Knaack Ulrich Knaack Poul H. Kirkegaard. Developing and testing a novel manufacturing method for complex geometry thin-walled GFRC panels by fabricating a 10 m high, self-supporting GFRC hyperbolic shell. Architectural Engineering and Design Management 19(1):1-31. August 2022. DOI: 10.1080/17452007.2022.2096557
15. Arnold, Matthias & Dietsch, Philipp & Winter, Stefan. (2023). Hyperbolic Paraboloid Shells made of Diagonal Laminated Timber Elements. 10.52202/069179-0483.
16. Farshad, M. (1992). Design of Hyperbolic Paraboloid Shells. In: Design and Analysis of Shell Structures. Solid Mechanics and Its Applications, vol 16. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1227-9_10
17. J. Christiansen, (editor), Hyperbolic Paraboloid Shells-State of the Art, American Concrete Institute, SP-110, Detroit, 1988

- 18 V. Gioncu, *Thin Reinforced Concrete Shells*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 1979
19. M. Melaragno, *An Introduction to Shell Structures - The art and Science of Vaulting*, Von Nostrand Reinhold, New York, 1991
20. F. Candela, "General Formulas for Membrane Stresses in Hyperbolic Paraboloid Shells", *ACI Journal, Proceeding*, Vol. 57, No. 4, PP 353–371, 1960
21. C. Faber, *Candela: The Shell Builder*, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1963
22. A. M. Haas, *Design of Thin Concrete Shells*, John Wiley & Sons, New York, 1962
- 23 M. Farshad, *Shell Structures*, (in Farsi), Shiraz University Press, Vol. I, 1986, Vol. II, 1987

ДОДАТКИ

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МАТЕРІАЛИ
ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ СТУДЕНТІВ
ТА АСПІРАНТІВ, ПРИСВЯЧЕНОЇ
МІЖНАРОДНОМУ ДНЮ СТУДЕНТА**

(13 - 17 листопада 2023 р., м. Суми)

Рекомендовано до друку науково-координаційною радою Сумського національного аграрного університету (протокол № 6 від 24.11.2023 р.)

Редакційна рада:

Ладика В.І., академік НААН України
Данько Ю.І., д.е.н., професор
Пасько О.В., к.е.н., доцент

Редакційна колегія:

Бричко А.М., к.е.н., доцент
Думанчук М.Ю., к.т.н., доцент
Кисельов О.Б., к.с.-г.н., доцент
Масик І.М., к.с.-г.н., доцент
Михайліченко М.А., к.і.н., доцент
Срібняк Н.М., к.т.н., доцент
Степанова Т.М., к.т.н., доцент
Шкромада О.І., д.вет.н., професор

**Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів і аспірантів,
присвяченої Міжнародному дню студента – (13-17 листопада 2023 р.). –
Суми, 2023. – 700 с.**

У збірку увійшли тези доповідей Всеукраїнської наукової конференції студентів і аспірантів,
присвяченої Міжнародному дню студента.
Для викладачів, студентів, аспірантів.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ В ЗАЛЕЖНОСТІ СТРИЛИ ПІДЙОМУ

Макаров Ю.Ю., Сирота М.М. студ. 2 м курсу, спец. 192 «Будівництво та цивільна інженерія», ФБТ
Срібняк Н.М., к.т.н., доцент
Сумський НАУ

Циліндричні оболонки – це різновид криволінійних поверхонь в Евклідовій геометрії. Така форма може бути ефективною формою для такого класу покриттів в будівництві як оболонки. Оболонки мають ряд переваг, серед яких є можливість перекрити значні прольоти без влаштування проміжних опор. Такі форми поверхонь можуть бути застосовані як в громадському будівництві, так і в сільському господарстві. Циліндричні оболонки відносять до поверхонь нульової кривини, оскільки в одному напрямку (l_2) її поверхню утворює крива другого порядку (парабола, еліпс, частина дуги кола, ланцюгова лінія та інші криві), а в протилежному напрямку (l_1) вона утворена прямою лінією (рис.1). Гаусова кривина поверхні, яка й характеризує вид поверхні дорівнює добутку кривин в двох напрямках. Оскільки в напрямку (l_1) форму поверхні утворює не крива лінія, а пряма, то кривина тут відсутня. Тому добуток головних кривин й дорівнює нулю, що й обумовлює назву поверхні - поверхня нульової Гаусової кривини.

Циліндрична поверхня є трансляційною поверхнею, тобто такою поверхнею, яка утворена переносом кривої другого порядку (твірна лінія) по двом паралельним прямим.

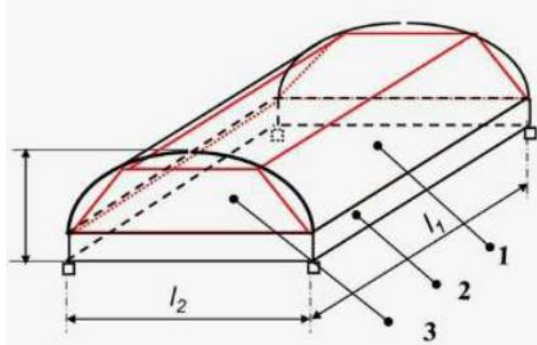


Рис. 1. Геометрична поверхня оболонки: облонка (скарлупа) -1; бортовий елемент -2; діафрагма -3

Якщо в об'єм оболонки вписати багатогранну призму, то оболонка є призматичною.

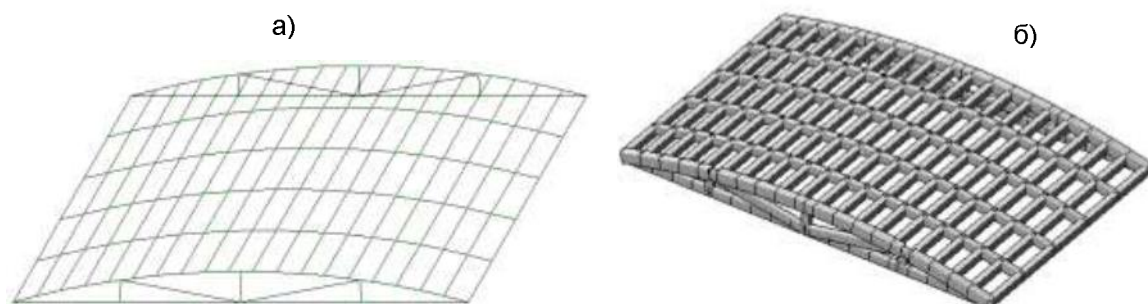


Рис.2 Скінченоелементна схема стержньової циліндричної оболонки -а; 3D модель оболонки – б

Геометрична форма циліндричної оболонки може бути конструктивно вирішена у вигляді тонкостінної оболонки (в монолітному чи збірному залізобетоні) або у вигляді системи перехресних сталевих. Останній варан може бути виконаний в вигляді плоскої сітки або у вигляді просторової решітчастої системи. Одним із факторів, що впливають на напружено-деформований стан оболонки є її висота (стріла підйому). Змінюючи цей геометричний параметр (рис.2) можна виконувати регулювання зусиль як в стержньових сталевих елементах, так і в тонкостінній оболонці (скарлупі).

Література

1. Дмитрий Городецкий Марина Ромашкина. Триангуляція. Побудова скінченно-елементних сіток. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://surl.li/nbqgm>

Жаріков Е.С., Волошко Т.П. РОЛЬ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ.....	72
Жогло Д.О., Бородай А.С. ДО АНАЛІЗУ ПРОБЛЕМИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ПАМ'ЯТОК КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ В СУМСЬКІЙ ОБЛАСТІ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОЇ АГРЕСІЇ.....	73
Забуга О.О., Срібняк Н.М. КЛАСИФІКАЦІЯ УКРИТТІВ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ	74
Заворотько Є.О., Бородай Д.С. ФАКТОРИ І ПРИНЦИПИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЄКТУВАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ.....	75
Загоруйко І.Ю., Циганенко Л.А., Циганенко Г.М. ВРАХУВАННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО РУЙНУВАННЯ НА КАРКАС БУДІВЛІ НА ПРИКЛАДІ ТОРГОВО-ОФІСНОГО ЦЕНТРУ У М. ПОЛТАВА	76
Іваній А. В. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ РОБОТИ КОНСТРУКТИВНИХ СИСТЕМ ПОКРИТТЯ ПРИ ЗМІНІ НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ МОНТАЖУ СЕС.....	77
Кизим К.Р., Бородай Д.С. КРИТЕРІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ВІДПОЧИНКУ У КАРПАТАХ.....	78
Клименко В.О., Бородай Д.С. АНАЛІЗ МЕРЕЖІ ГОТЕЛІВ В СТРУКТУРІ МІСТА СУМИ	79
Кравченко А.В., Савченко О.С., Савченко Л.Г. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРНИХ ЗГИНАЛЬНИХ МОМЕНТІВ В ЗАЦЕМЛЕНИХ БАГАТОПУСТОТНИХ ПЛИТАХ ПЕРЕКРИТТЯ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМУВАННЯ ВІД ЖОРСТКОСТІ ОСНОВИ.....	80
Кручик А.М., Андрух С.Л. ГІДРОІЗОЛЯЦІЯ СТАРОЇ ЗАБУДОВИ.....	81
Кулик В.Ю., Срібняк Н.М., Галушка С.А. МЕТОД РЕГУЛЯЦІЇ ЗУСИЛЬ В СТРУКТУРНІЙ ПЛИТІ.....	82
Кучерявенко С.В., Андрух С.Л. ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ПОЛІКАРБОНАТНИХ СИСТЕМ В БУДІВНИЦТВІ	83
Лампак В.М., Рудіченко О.І., Роговий С.І. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ	84
Левицький А.О., Новицький О.П. СУМІСНА РОБОТА ТРУБОБЕТОННИХ КОЛОН ІЗ СТАЛЕВИМ ПЕРЕКРИТТЯМ	85
Левікова А.І., Бородай Д.С. ОСОБЛИВОСТІ АРХІТЕКТУРНО-ПЛАНУВАЛЬНОГО ВИРІШЕННЯ ДИТЯЧИХ САДКІВ	86
Левікова А.І., Бородай Я.О. ОСОБЛИВОСТІ ТА ПРИЙОМИ АРХІТЕКТУРНО-ПЛАНУВАЛЬНОГО ВИРІШЕННЯ БУДІВЕЛЬ ДИТЯЧИХ САДКІВ.....	87
Лимаренко Р., Сохошко В., Циганенко Л.А., Циганенко Г.М. ПИТАННЯ ЗАХИСНИХ УКРИТТІВ	88
Лихіцький Ю.В., Горлач Т.Л. УМОВИ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗЕРНОВИХ ВАНТАЖІВ	89
Лихіцький Ю.В., Горлач Т.Л. ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗЕРНА ЯК ВАНТАЖУ, ЩО ПЕРЕВОЗИТЬСЯ.....	90
Лобанов В.В., Бородай А.С. ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СУЧАСНИХ ЖИТЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ В УМОВАХ СЬОГОДЕННЯ	91
Лободін В.М., Новицький О.П. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗАКРІПЛЕННЯ ОСНОВ ПРИ ЗВЕДЕННІ БУДІВЕЛЬ БІЛЯ РІЧОК.	92
Лузан Є.А., Бородай А.С. ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПРОЄКТУВАННЯ ЗАКЛАДІВ ДЛЯ ВІДПОЧИНКУ І ОЗДОРОВЛЕННЯ В УКРАЇНІ.....	93
Макаренко В., Циганенко Л.А. ФОРМОУТВОРЕННЯ СТРУКТУРНИХ ГРАТОК.....	94
Макаров Ю.Ю., Сирота М.М., Срібняк Н.М. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ В ЗАЛЕЖНОСТІ СТРИЛИ ПІДЙОМУ"	95
Мельниченко Ю.М., Саржанов О.А. ЗЕРНОВА КРИЗА ТА НАВІГАЦІЯ: ВИКЛИКИ ДЛЯ ГЛОБАЛЬНОЇ ПРОДОВОЛЬЧОЇ БЕЗПЕКИ.....	96
Митрофанов В.В., Срібняк Н.М. ВРАХУВАННЯ ФІЗИЧНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ ПРИ РОЗРАХУНКУ ПЛОСКОЇ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ РАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ПК ЛИРА.....	97
Мірошник М.О., Бородай А.С. СИМВОЛІЗМ АРХІТЕКТУРИ СОБОРУ ПАРИЗЬКОЇ БОГОМАТЕРІ.....	98
Надеїна О.В., Срібняк Н.М., Галушка С.А. ВПЛИВ ТРИЩИНОУТВОРЕННЯ НА ПЕРЕРОЗПОДІЛ ЗУСИЛЬ В ПЕРЕКРИТТЯХ.....	99
Надтачєєв О.М., Новицький О.П. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ НАЙШВИДШИХ ВАРИАНТІВ УТЕПЛЕННЯ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЛІ З УРАХУВАННЯМ ЯКОСТІ ВИКОНАННЯ РОБІТ	100
Нежинський Д.П., Новицький О.П. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ ПРИДАТНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО УТЕПЛЕННЯ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ В ПОРІВНЯННІ З ВНУТРІШНІМ УТЕПЛЕННЯМ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	101
Нежинський Д.П., Новицький О.П. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ ПРИДАТНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАБРИЗНОГО УТЕПЛЮВАЧА ПІНОПОЛІУРЕТАНУ НА ВІДМІНУ ВІД МІНЕРАЛЬНОЇ ВАТИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	102
Петрова С.М., Бородай Д.С. ОСНОВНІ ЕТАПИ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ВНУТРІШНЬОГО ПРОСТОРУ ВЕТЕРИНАРНИХ КЛІНІК.....	103

Сумський національний аграрний університет

Кафедра будівельних конструкцій

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ГІПЕРБОЛІЧНОЇ ОБЛОНОКИ ПОКРИТТЯ

Здобувач: Макаров Ю.Ю.

Керівник- к.т.н., доцент Срібняк Н.М.

Суми - 2024

Актуальність теми

- Сучасні системи автоматизованого проектування й програми кінцевоелементного аналізу (ArchiCAD, AutoCAD, Компас, Ліра, MicroFe, ANSYS й інші) дозволяють легко побудувати образ-модель конструкції, що проектується, виконати її статичний і конструктивний розрахунки і розробити проектну документацію
- Рациональної статичної роботи тонкостінної конструкції з криволінійною поверхнею другого порядку можна досягти шляхом оптимізації форми поверхні, оскільки «несуча здатність конструкції є функцією її геометричної форми»
- Тому дослідження напружено-деформованого стану оболонок подвійної відємної гаусової кривини є **актуальною задачею**.

Мета роботи:

Дослідження напружено-деформованого стану декількох моделей тонкостінних залізобетонних оболонок, що являють собою скомпоновані на квадратному плані гіперболічні поверхні.

Геометричні параметри оболонок (товщина, розміри в плані, стріла підйому) є однаковими.

Різниця полягає лише у способі компонування окремих фрагментів гіперболічної поверхні на квадратному плані.

Від формоутворення (способу компонування) і залежить напружено-деформований стан оболонки.

Задачі дослідження

- ознайомлення з формоутворенням поверхні типу гіперболічний параболоїд;
- вивчення особливостей та принципів статичної роботи поверхні, що не розгортається – поверхні гіперболічного параболоїду;
- створення за допомогою методу кінцевих елементів декількох розрахункових моделей хвилястих конгруентних гіпарів, що утворюють поверхні за формою «гриб» та «шатер»;
- виконання статичного розрахунку в ПК ЛИРА-САПР обраних чотирьох варіантів конструкцій;
- аналіз результатів статичного розрахунку та вибір найбільш ефективної форми складених гіпарів за оцінкою їх напружено-деформованого стану

- **Об'єкт дослідження** –тонкостінні залізобетонні складені з однакових фрагментів на квадратному плані гіперболічні оболонки..
- **Предмет дослідження** – напружено-деформований стан, що виникає в тонкостінних залізобетонних складених з однакових фрагментів на квадратному плані гіперболічних оболонках.
- **Методи дослідження** – метод комп'ютерного моделювання конструкцій із застосуванням програмних комплексів, що реалізують метод кінцевих елементів (ПК ЛІРА-САПР 2024).

Практичне значення отриманих результатів

- Результати досліджень дозволяють визначити з декількох можливих форм тонкостінних залізобетонних гіперболічних оболонок більш раціональну з точки зору статичної роботи поверхню.

Загальні відомості щодо гіперболічних поверхонь

- Гіперболічним параболоїдом називається поверхня, яка визначається в деякій прямокутній системі координат $Oxyz$ канонічним рівнянням

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 2 \cdot z$$

a і b – додатні параметри, що характеризують параболоїди.

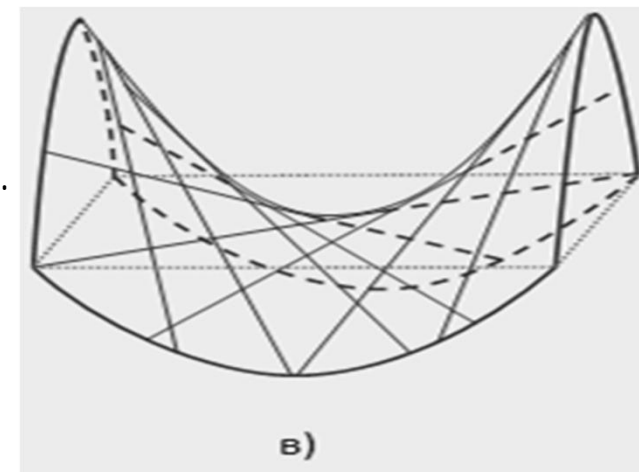
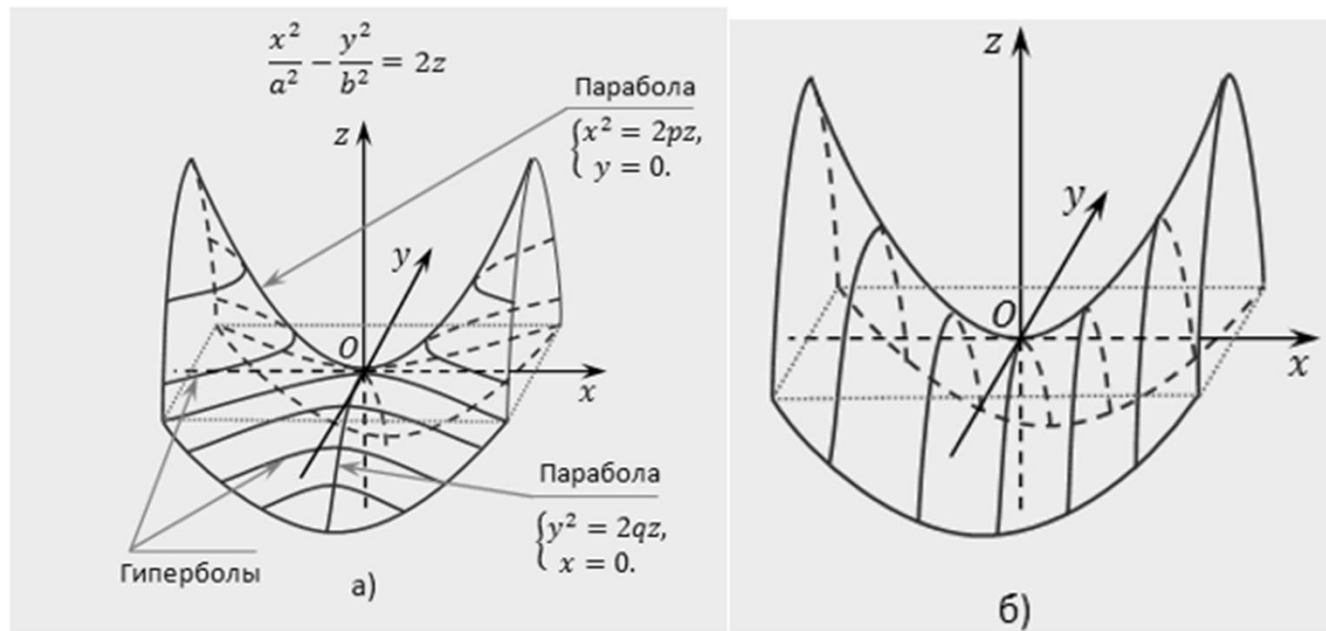


Рис.1. Перерізи гіперболічного параболоїду (а); параболічні твірні гіперболічного параболоїду (б); прямолінійні твірні гіперболічного параболоїду (в)

- Поверхня оболонки за формою гіпару утворюється переміщенням прямої AB (твірної), що паралельна площині XOZ , вздовж двох непаралельних та прямих BC та AD , що не перетинаються (рис. 2). Перетин цієї поверхні площиною $OZAC$ являє собою **параболу**, що обернена випуклістю вгору, а перетин площиною $OZBD$ – **параболу**, що обернена випуклістю вниз. Будь-яка площина, що є паралельною площині OXY , дає в перетині з поверхнею **гіперболу**.

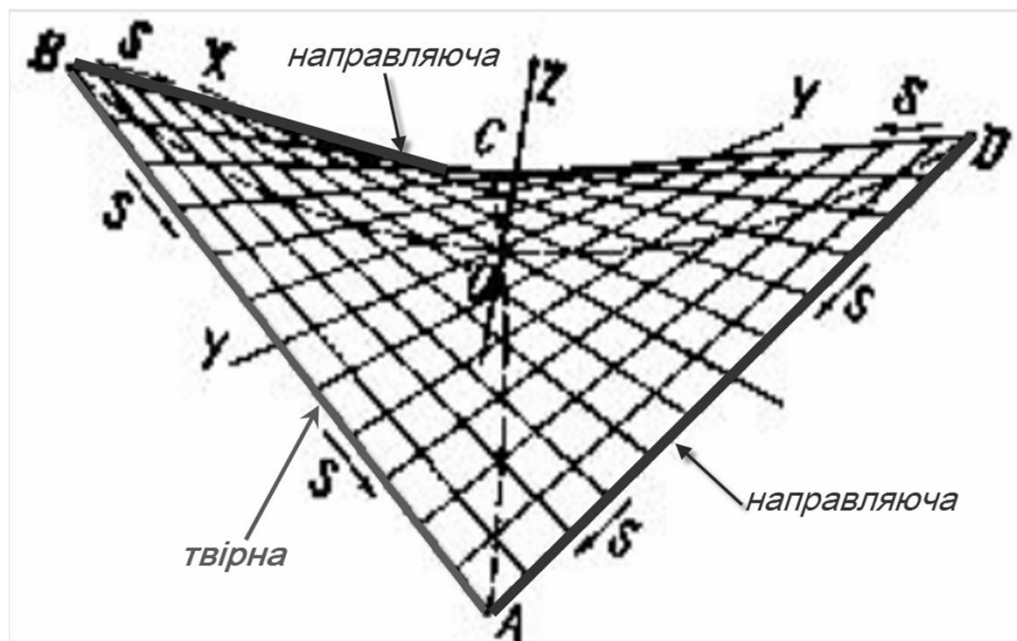


Рис.2 Утворення поверхні гіпару плоскопаралельним переміщенням твірної прямої по двом направляючим, що лежать навхрест

Поверхня гіпару може бути утворена також плоскопаралельним переміщенням твірної параболі по параболі, що є направляючою

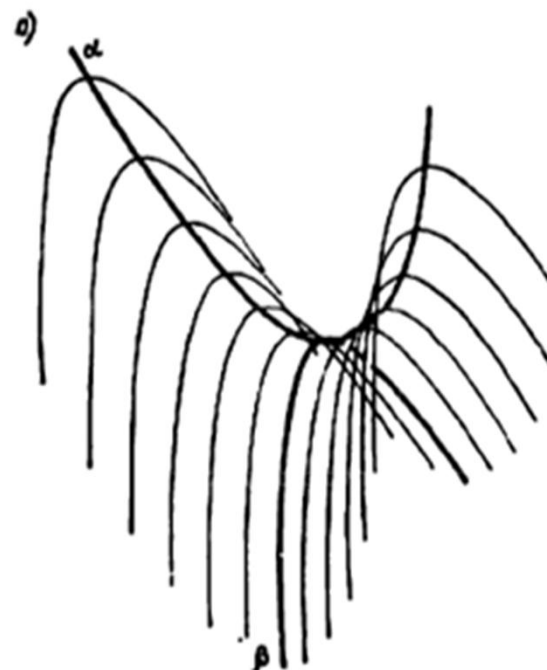
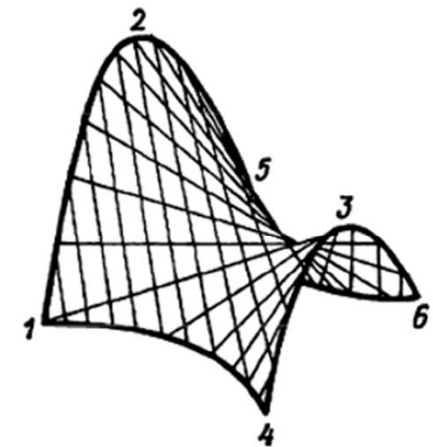
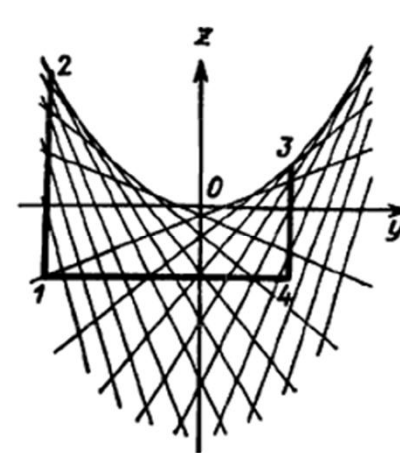
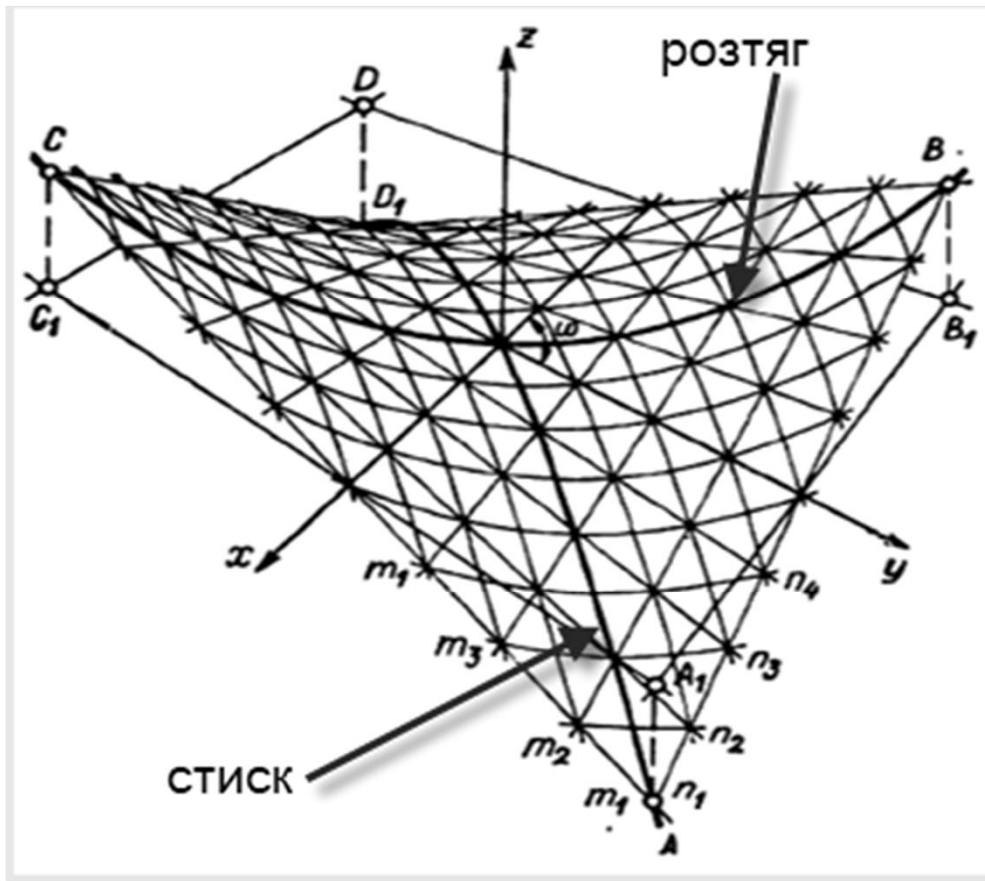


Рис.3 Утворення поверхні гіпару ковзанням параболі по параболі

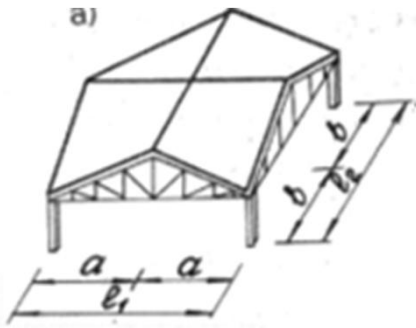
Таким чином, природа гіпару є **ПОДВІЙНОЮ**. Його поверхня є одночасно системою прямолінійних та криволінійних твірних



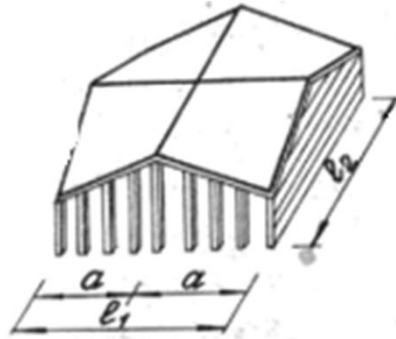
Для оболонок, що зводяться в монолітному залізобетоні, найбільш зручними є геометричні форми з прямолінійними твірними.

Складені оболонки типу гіпар

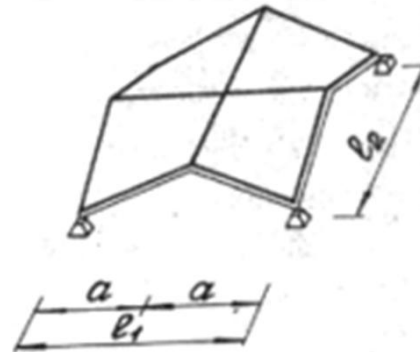
- Складені оболонки від'ємної гаусової кривини (складові гіпару), можуть застосовуватися для будівель з планом у вигляді прямокутника з співвідношенням сторін від 1:1 до 1:2.



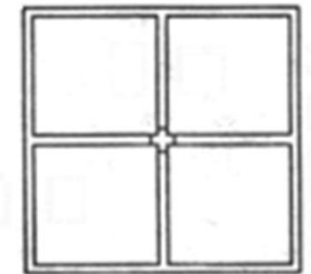
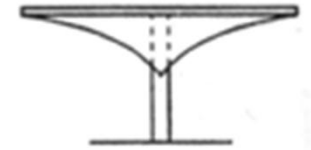
Шатровий гіпар зі спиранням на ферми



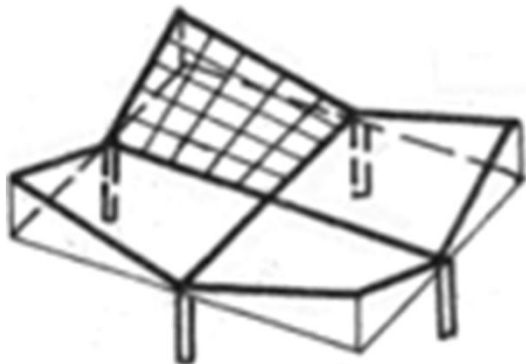
Шатровий гіпар зі спиранням на колони чи стіни



Шатровий гіпар з опертям в спадаючих кутах на фундамент



Гіпар типу грибок



Гіпар типу квітка

Поверхні, що прийняті до розгляду

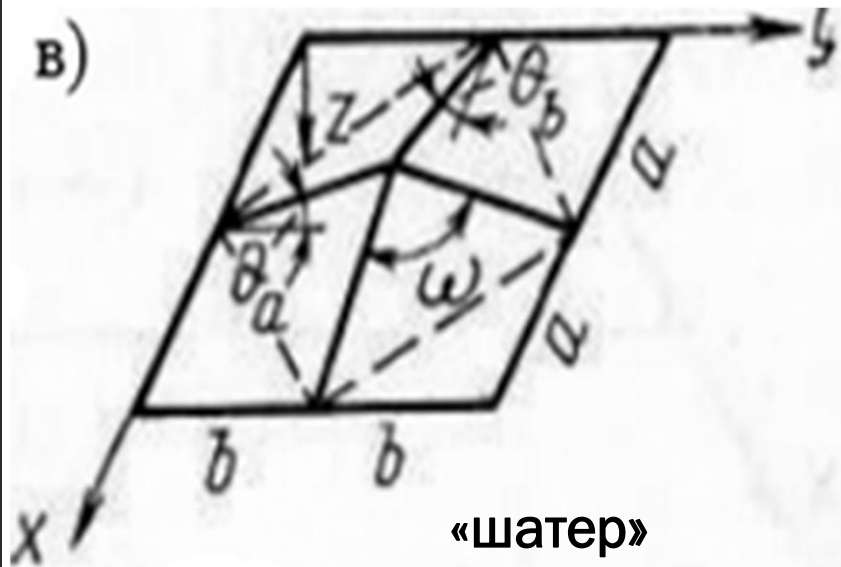
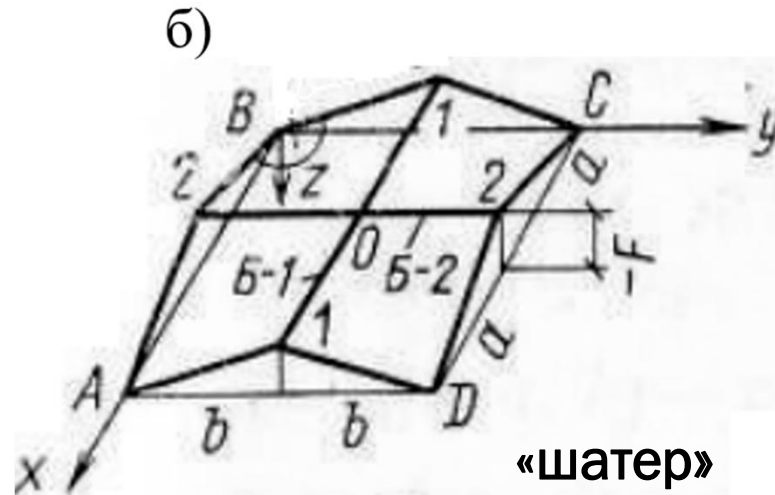
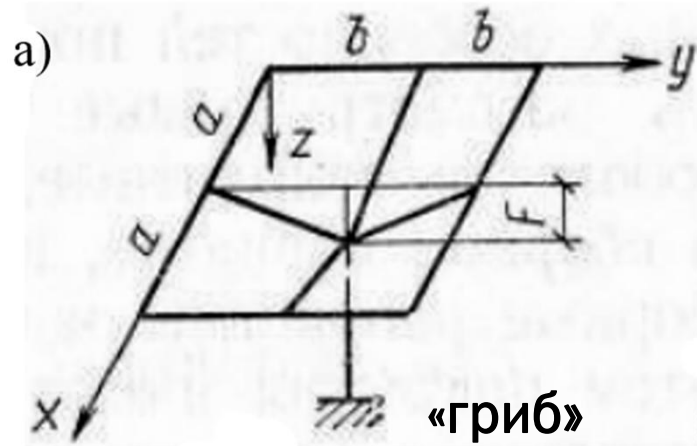


Рис. Схеми гіперболічних складених оболонок на прямокутному плані: поверхня типу «гриб» – а; поверхня типу «шатер» – б, в

Таблиця 1. Гіперболічні оболонки, які досліджуються

Тип гіперболічної поверхні	№ схеми та її назва	Просторова модель поверхні	Розміри в плані, м
«Гриб»	1 Гіпар-«гриб», що спирається на одну колону		24×24
	2 Гіпар-«гриб», що спирається на чотири похилих колони		24×24
«Шатер»	3 Гіпар- «шатер»		24×24
	4 Гіпар-«шатер» з підкосами		24×24

Для всіх чотирьох оболонок прийнято базовий гіперболічний параболоїд розміром 12x12 м (1/4 поля оболонки)

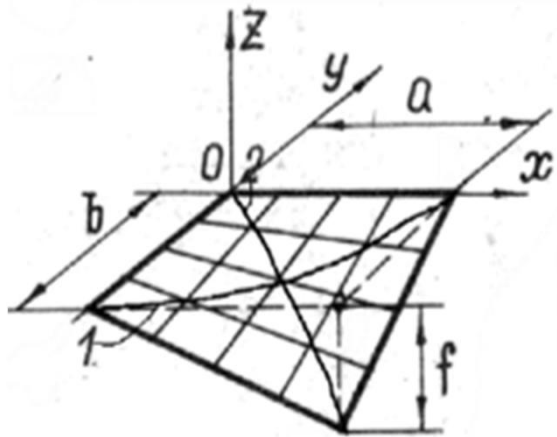


Рис. 1. Базовий гіперболоїд для поверхонь типу грибок (схема №1 та схема №2)

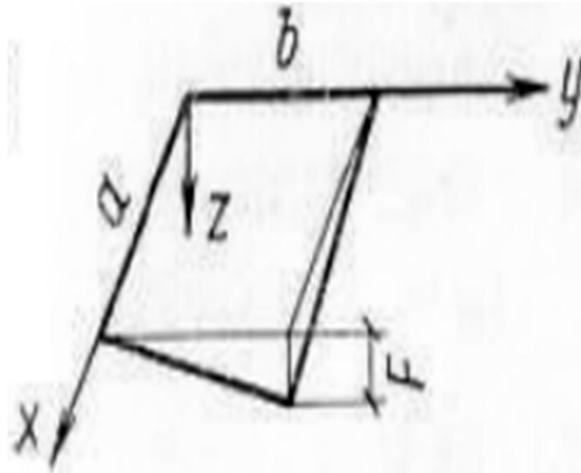


Рис. 2. Базовий гіперболоїд для поверхні гіпар-«шатер» (схема №3)

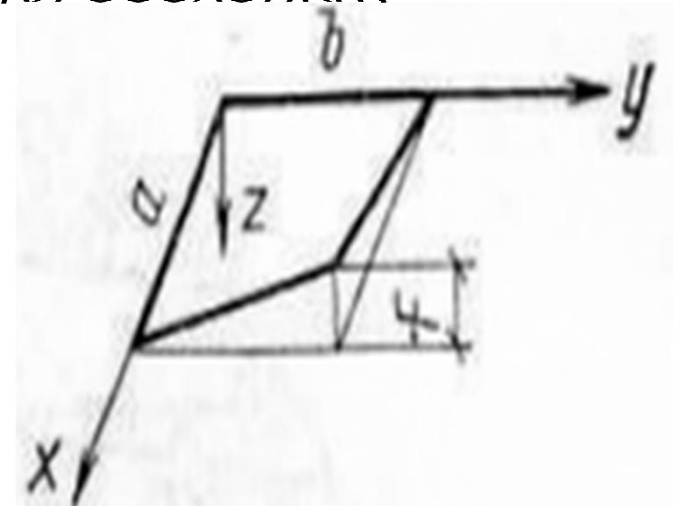


Рис. 3. Базовий гіперболоїд для поверхні гіпар-«шатер» з підкосами (схема №4)

Серединна поверхня базового гіпару (чверті оболонки), в координатах, представлених на рис. 1 виражається рівнянням:

$$Z = f_{xy} / (\alpha b)$$

$$z = 4xy / (12^2) = xy / 36$$

де: f – стріла підйому; a і b – розміри сторін прямокутної основи базового гіпару, відповідно за напрямками X і Y .

Кінцевоелементні розрахункові схеми

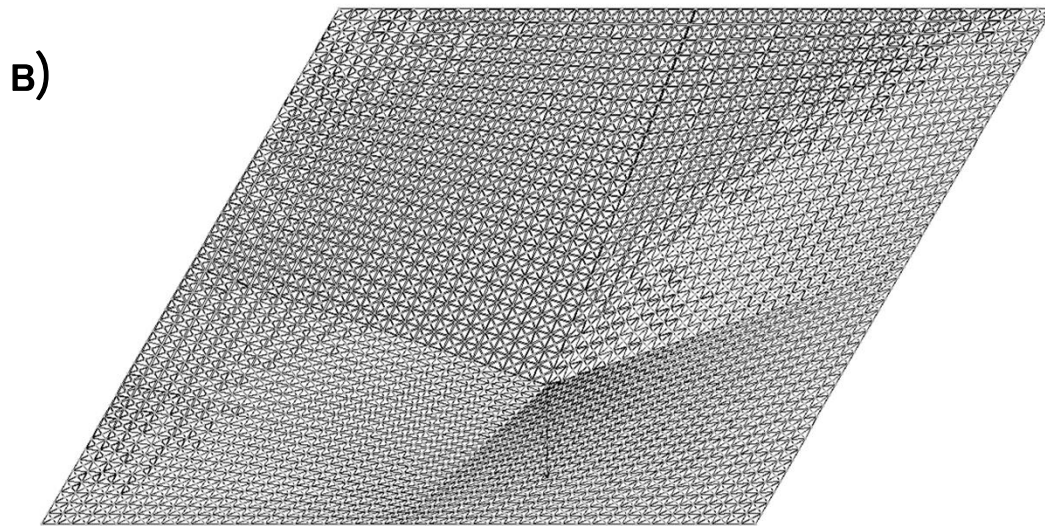
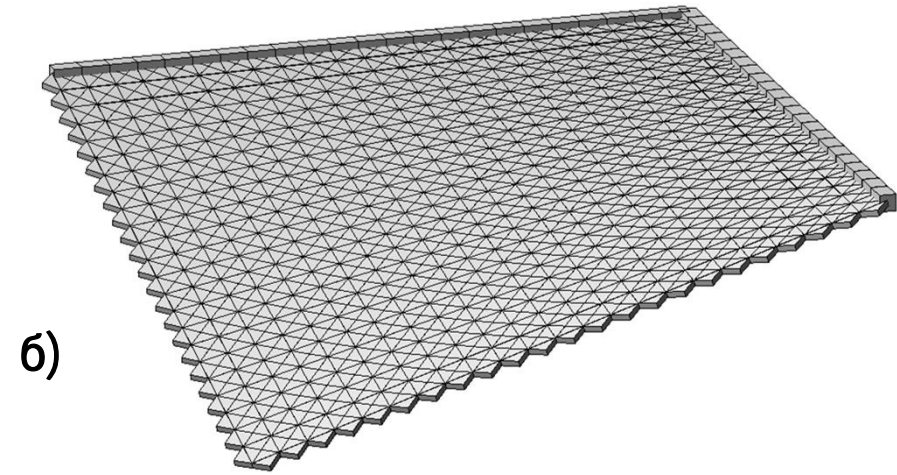
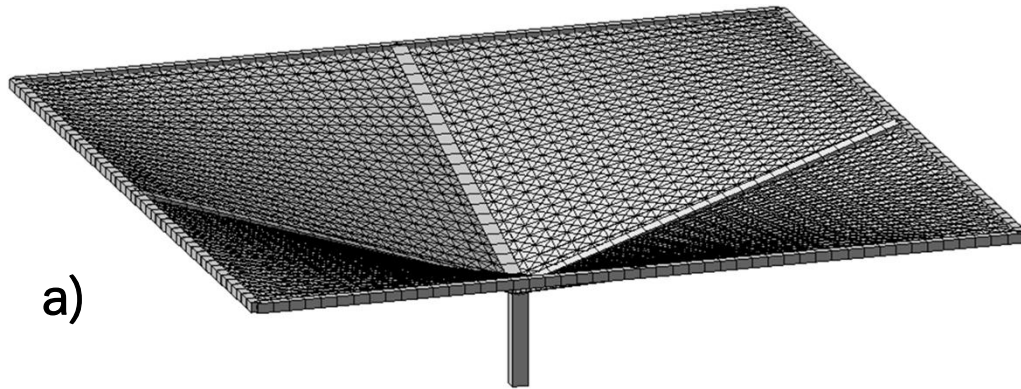


Рис Прострова модель оболонки
 («гіпар-гриб») (а); $\frac{1}{4}$ фрагменту
 просторової моделі (б) та
 кінцевоелементна схема №1 (в)

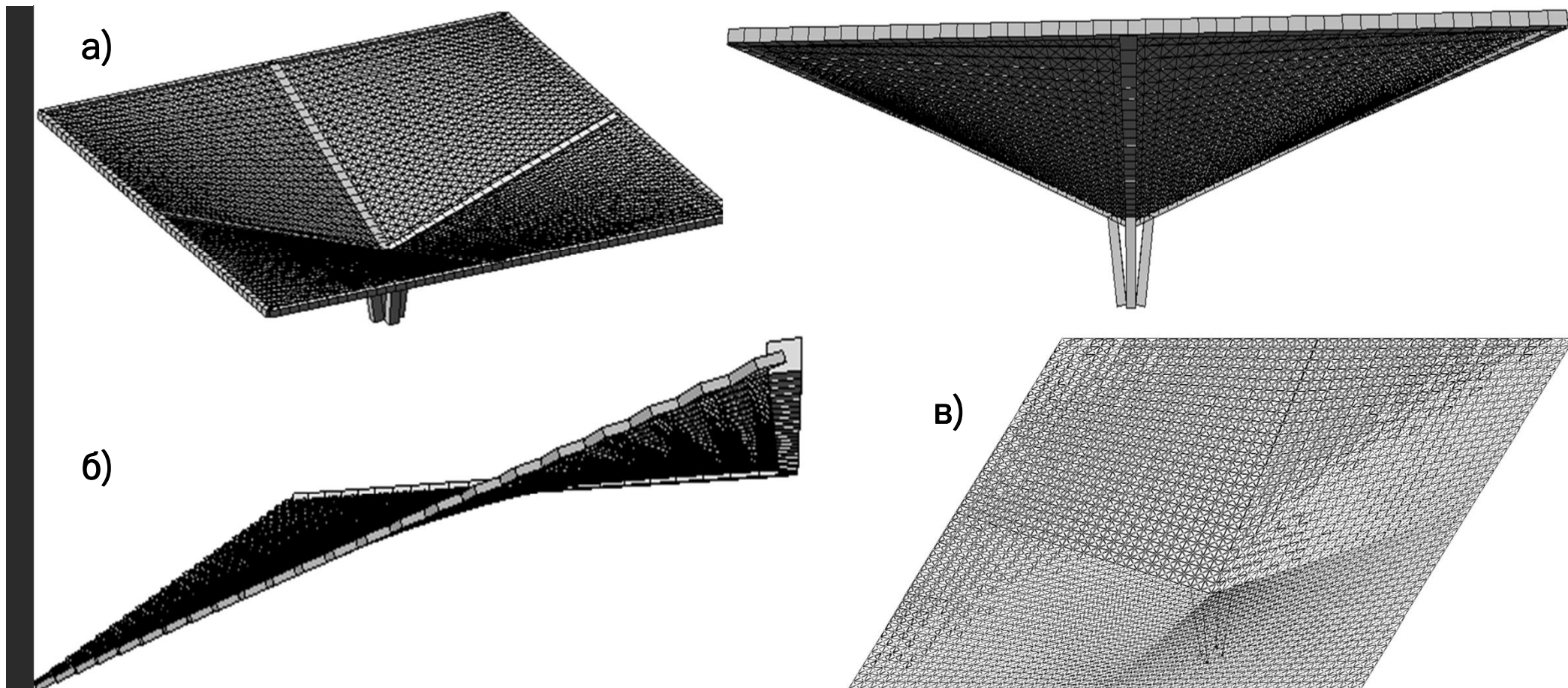


Рис Прострова модель оболонки «гіпар-гриб з похилими стійками» (а); $\frac{1}{4}$ фрагменту просторової моделі - (б) та кінцевоелементна схема №2 -(в)

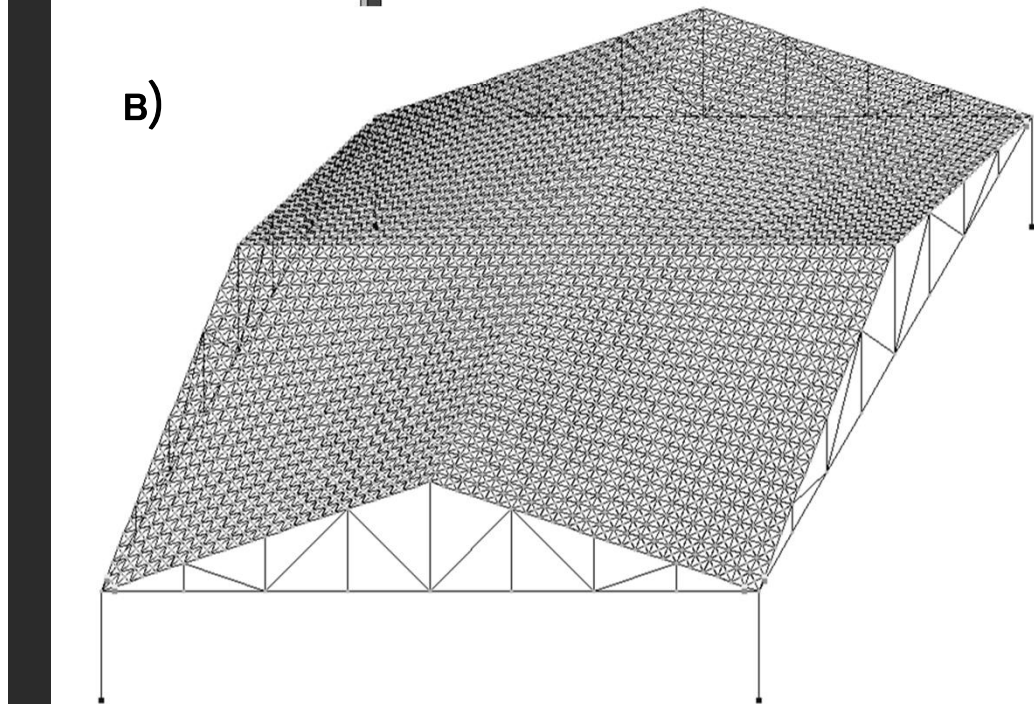
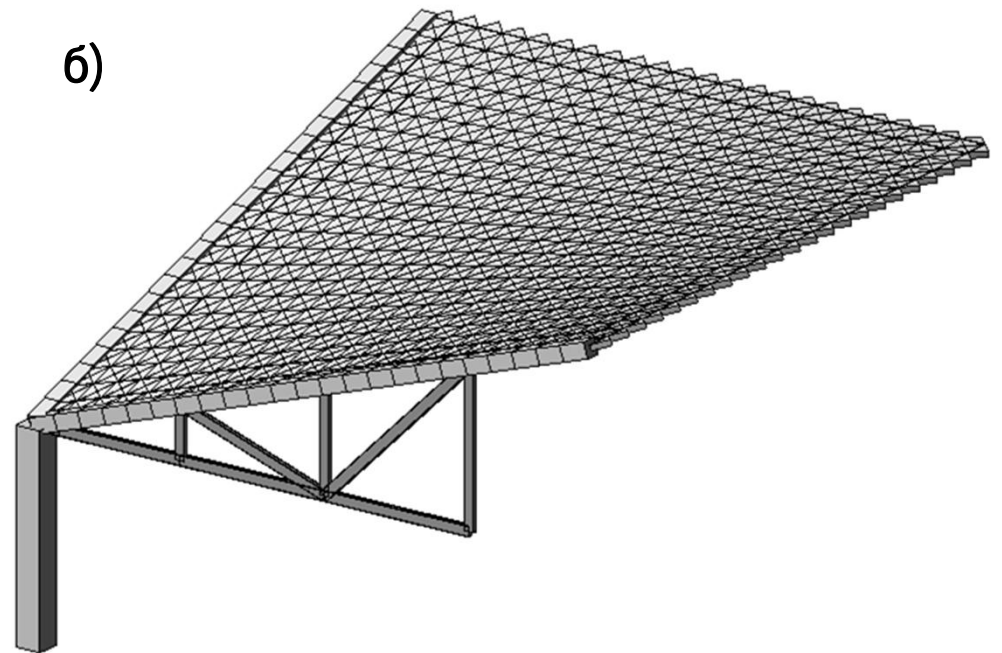
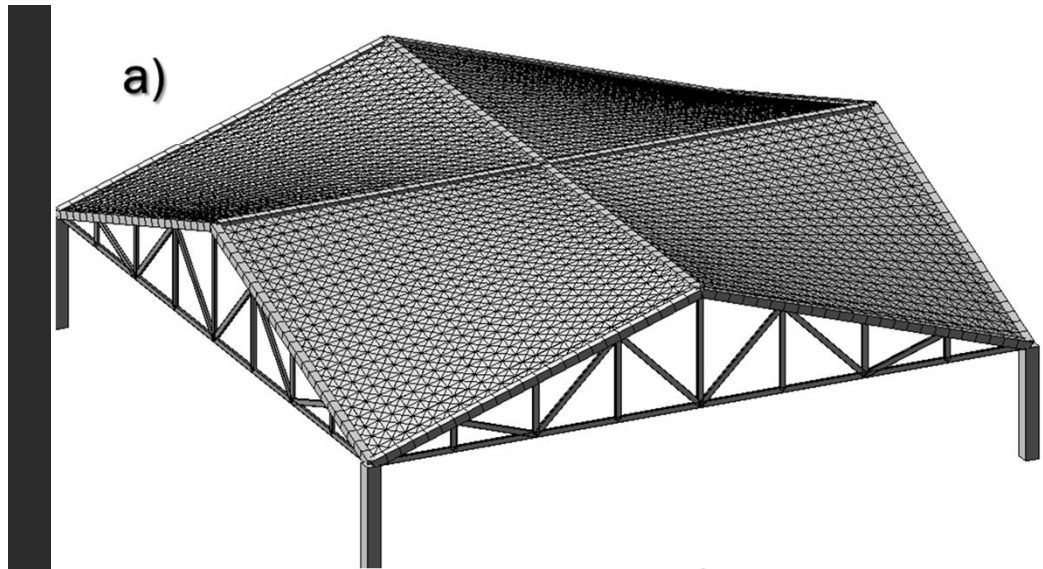


Рис. Просторова модель оболонки («гіпар-шатер») (а); $\frac{1}{4}$ фрагменту просторової моделі- (б) та кінцевоелементна схема №2 - (в)

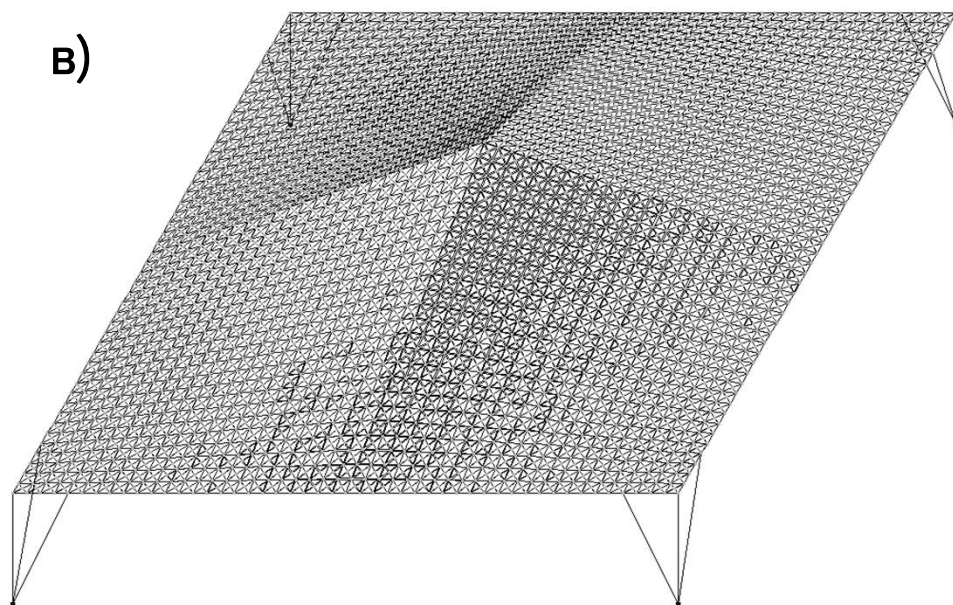
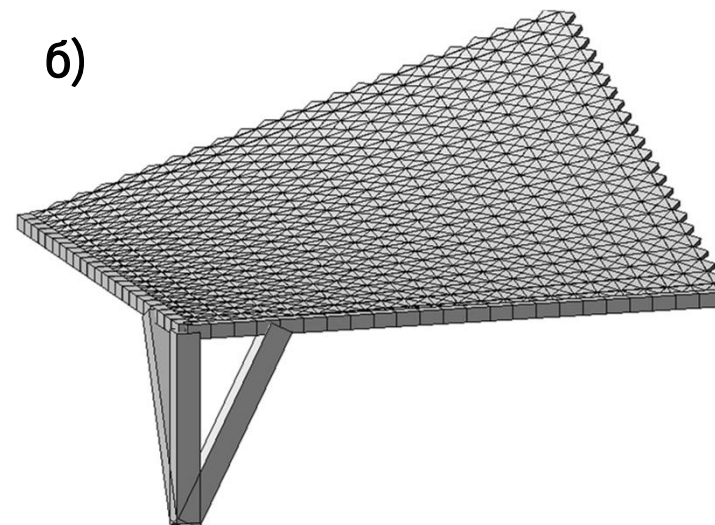
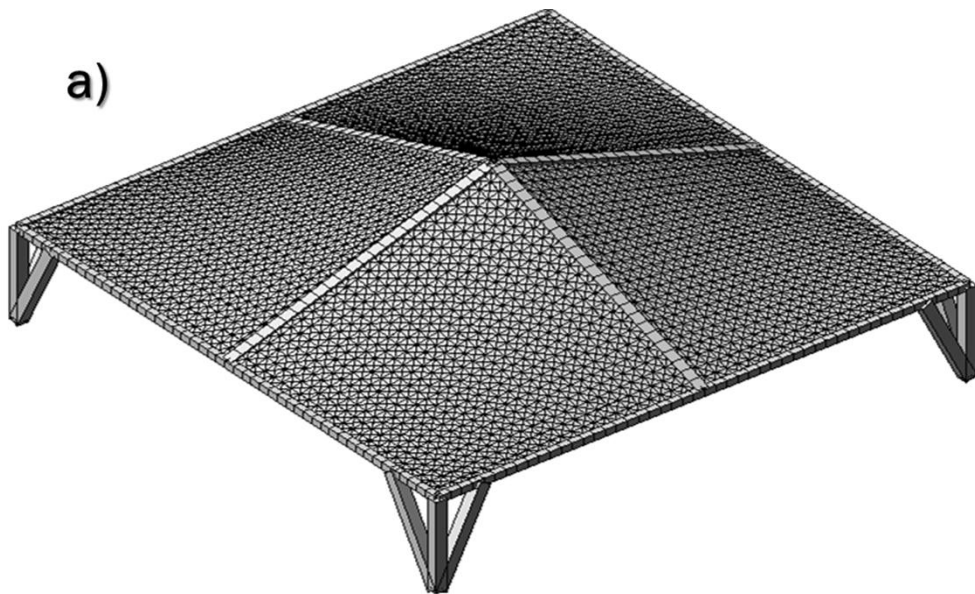


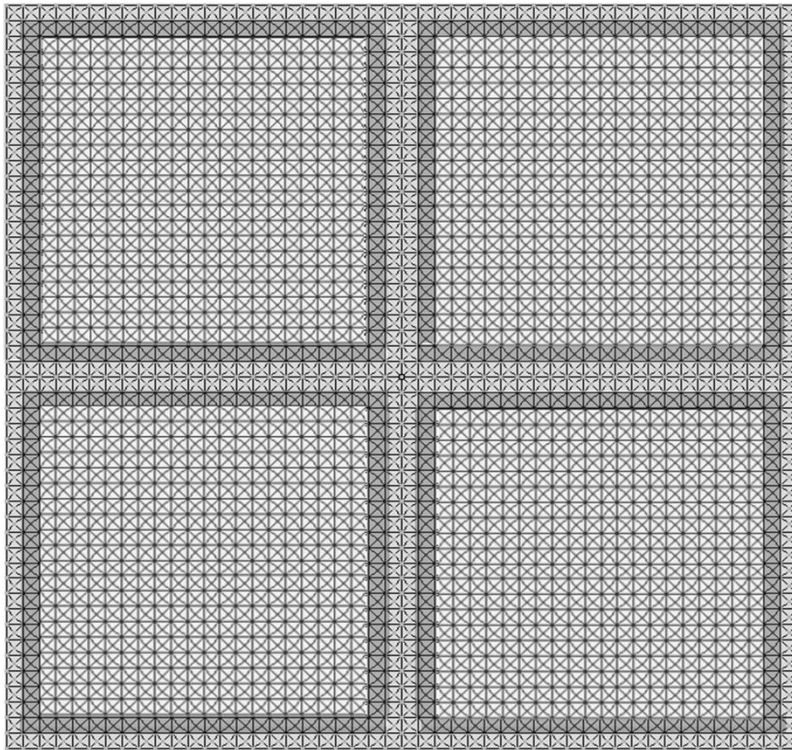
Рис. Просторова модель оболонки типу «гіпар з підкосами» (а); $\frac{1}{4}$ фрагменту просторової моделі (б) та кінцевоелементна схема №4 (в)

Матеріал для оболонок



- Характеристики матеріалу оболонок прийняті наступними: важкий бетон класу С 20/25 ($E_{cd}=23,0$ ГПа , $f_{cd}=14,5$ МПа= $1478,08$ т/м² , $f_{ctd}=1,0$ МПа= $101,9$ т/м²).
- Для власне оболонки приймаємо дротяну арматуру класу В400, $f_{yd}=410$ МПа, для бортових елементів і колон арматуру класу А400, $f_{yd} = 365$ МПа

ЖОРСТКІСНІ ПАРАМЕТРИ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Товщина поля оболонки є змінною й складає від 7,0 до 11,0 см.



Розподіл товщини оболонки:  – товщина поля 7 см;

 – товщина поля 9 см;  – товщина поля 11 см

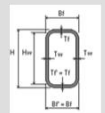
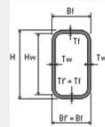
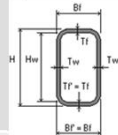
Таблиця 1 Характеристики жорсткостей конструктивних елементів оболонки типу гіпар-гриб (схема №1)

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м ²	R, т/м ³	μ
Тонкостінна оболонка змінної товщини	7,9,11	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Бортовий контурний елемент	30×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Конькові балки (середні)	50×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Колона	50×50	3,06·10 ⁶	2,5	0,2

Таблиця 2 Характеристики жорсткостей конструктивних елементів оболонки типу гіпар-«гриб» на чотирьох похилих колонах (схема №2)

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м ²	R, т/м ³	μ
Тонкостінна оболонка змінної товщини	7,9,11	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Бортовий контурний елемент	30×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Конькові балки (середні)	50×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Колона	50×50	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Похилі стійки	50×50	3,06·10 ⁶	2,5	0,2

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м ²	R, т/м ³	μ
Тонкостінна оболонка змінної товщини	7,9,11	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Бортові контурні балки	30×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Конькові балки (середні)	30×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Колони	50×50	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Нижній пояс ферм	Профіль «Молодечно» 240×160×8	3,06·10 ⁶	2,5	0,3
Стойки ферм	Профіль «Молодечно» 160×160×8	2,1·10 ⁷	7,85	0,3
Розкоси ферм	Профіль «Молодечно» 160×160×8	2,1·10 ⁷	7,85	0,3



Таблиця 3. Характеристики жорсткостей конструктивних елементів оболонки типу гіпар –«шатер» (схема №3)

Таблиця 4. Характеристики жорсткостей конструктивних елементів оболонки типу гіпар –«шатер з підкосами» (схема №4)

Назва елемента	Поперечний переріз, см	E, т/м ²	R, т/м ³	μ
Тонкостінна оболонка змінної товщини	7,9,11	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Бортові контурні балки	30×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Конькові балки (середні)	50×30	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Вертикальні стійки	50×50	3,06·10 ⁶	2,5	0,2
Підкоси	50×50	50×50	2,5	0,2

Таблиця .Навантаження на 1 м² поверхні оболонки

№ з/п	Назва елементів конструкції	Характеристичне Значення навантаження, (Н/м ²)	Коефіцієнт надійності за навантаженням γ_f	Розрахункове Значення навантаження (Н/м ²)
I. Постійне навантаження				
1.	Покрівля з м'яких рулонних матеріалів	100	1,3	130
2.	Вирівнюючий шар із шпатлівки по армованій пластмасовій сітці $t=1,0$ см, $\rho = 2000$ Н/м ³	200	1,3	260
3.	Утеплювач із піноплексу $t=10,0$ см на клею $\rho = 800$ Н/м ³	80	1,3	104
4.	Пароізоляція	10	1,3	13
5.	Власна вага залізобетонної оболонки $t=5,0$ см, $\rho = 25000$ Н/м ³ , $g_{нор}=1250$ Н/м ² , $g_{рас}=1375$ Н/м ²	Враховується автоматично при роботі комплексу ЛІРА-САПР		
Всього постійне:		390	1,3	507
I. Тимчасове (снігове) навантаження				
6.	м. Суми	1638,3	1,14	1867,32

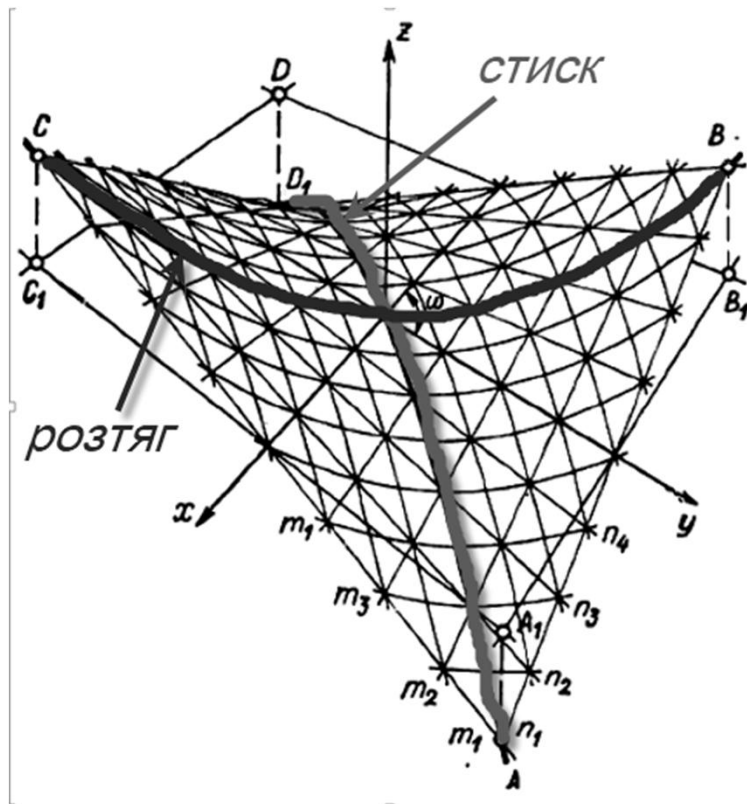
НАВАНТАЖЕННЯ

В якості основного сполучення навантажень (РСН1) приймаємо власну вагу з/б оболонки, вагу покрівлі та снігове навантаження на все поле оболонки.

Визначення головних напружень, що характеризують НДС оболонки будемо виконувати від РСН 1.

Перевірка стійкості поверхонь

- З точки зору статичної роботи можна припустити, що опуклі параболи оболонки працюють подібно аркам на стиск, а увігнуті зони – на розтягнення подібно гнучким ниткам.
- Стиснуті зони оболонки необхідно перевірити на стійкість.



Стійкість оболонки вважається забезпеченою, якщо середня інтенсивність розподіленого навантаження q_{av} не перевищує її критичного значення q_{cr}

$$q_{av} \leq q_{cr} = 0,05 E_b \cdot t^2 / (R_{av})^2,$$

де: E_b – початковий модуль пружності бетону;

t – товщина оболонки;

R_{av} – середній радіус кривизни головною опуклою параболи базової оболонки (уздовж діагоналі основи), обчислюється за співвідношенням:

$$R_{av} = (\ell^2 / 8f_p) + f_p / 2,$$

де: f_p – стріла підйому опуклою параболи оболонки, яка визначається в середині діагоналі базового гіпару;

ℓ – довжина діагоналі основи базового гіпару.

Перевірка стійкості оболонок типу «гриб»

- Перевіримо стійкість оболонки за співвідношенням (2.2). $q_{av} \leq q_{cr} = 0,05 E_b \cdot t^2 / (R_{av})^2$,
- Згідно обчислень за табл. повне розрахункове навантаження на оболонку:
- $q_{av} = 507 + (0,07 \cdot 25000 \cdot 1,1) + 1867,32 = 4299,32 \text{ Н/м}^2$.
- $q_{cr} = 0,05 E_b \cdot t^2 / (R_{av})^2 = 0,05 \cdot 3000000 \cdot (0,07)^2 / (36,5)^2 = 0,5516 \text{ т/м}^2 = 5516 \text{ Н/м}^2$;
- $5516 \text{ Н/м}^2 > 4299,32 \text{ Н/м}^2$.
- Стійкість забезпечена.
- Товщина оболонки в місці примикання до бортового елемента на ширині 1,0 м плавно змінюється від 14 см до 7 см (для звичайно елементної схеми: в смузі 0,5 м від контурного елемента – 11 см, в смузі від 0,5 м до 1 м – 9 см)

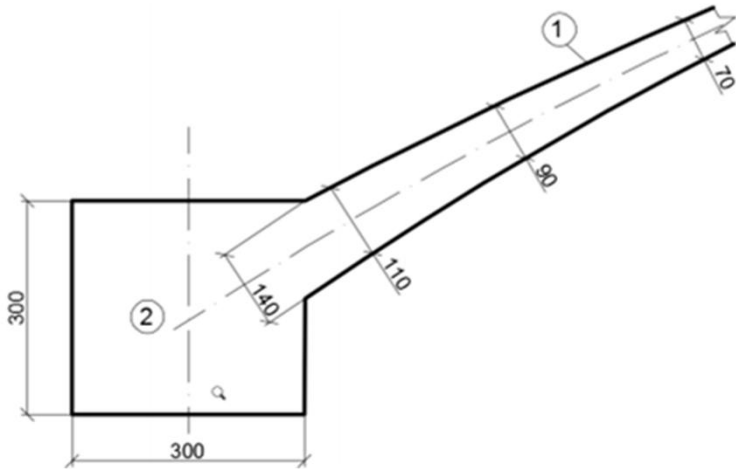


Рис. Примикання оболонки до бортового елемента: 1 – оболонка;
2 – бортовий елемент

Перевірка стійкості оболонки типу «шатер»

- Перевіримо стійкість оболонки за співвідношенням $q_{av} \leq q_{cr} = 0,05 E_b \cdot t^2 / (R_{av})^2$, :
- Обчислимо середній радіус кривизни головної опуклої параболи за :

$$\ell = (\alpha^2 + b^2)^{0,5} = (12^2 + 12^2)^{0,5} = 16,97 \text{ м.}$$

Обчислюємо стрілу підйому головної опуклої параболи базового гіпару.
Максимальна стріла підйому f_p знаходиться в точці з координатами $x = \alpha/2$, $y = b/2$.
За співвідношенням $R_{av} = (\ell^2/8f_p) + f_p/2$, знаходимо:

$$f_p = z(\alpha/2, b/2) = f \cdot (\alpha/2 \cdot b/2) / (\alpha b) = f / 4 = 4 / 4 = 1 \text{ м.}$$

$$R_{av} = \ell^2 / (8f_p) + f_p / 2 = 16,97^2 / (8 \cdot 1) + 1 / 2 = 36,5 \text{ м,}$$

Обчислюємо критичне навантаження:

$$q_{cr} = 0,05 E_b \cdot t^2 / (R_{av})^2 = 0,05 \cdot 30000 \cdot (100)^2 / (36,5)^2 = 0,281 \text{ т/м}^2 = 2810 \text{ Н/м}^2.$$

Повне розрахункове навантаження на оболонку:

$$q_{av} = 507 + 1375 + 1867,32 = 37849,32 \text{ Н/м}^2.$$

$$q_{cr} = 2810 \text{ Н/м}^2 < 37849,32 \text{ Н/м}^2.$$

Стійкість оболонки не забезпечена. Збільшуємо товщину оболонки до $t = 7$ см.

- Перераховуємо повне розрахункове навантаження на оболонку:

$$q_{av} = 507 + (0,07 \cdot 25000 \cdot 1,1) + 1867,32 = 4299,32 \text{ Н/м}^2$$

$$q_{cr} = 0,05 E_b \cdot \frac{t^2}{(R_{av})^2} = 0,05 \cdot 30000 \cdot 100 \cdot \frac{0,07^2}{(36,5)^2} = 0,5516 \frac{\text{Т}}{\text{м}^2} = 5516 \text{ Н/м}^2$$

Висновок: Стійкість забезпечена

Товщина оболонки в місці примикання до бортового елемента на ширині 1,0 м плавно змінюється від 14 см до 7 см (для кінцевоелементної схеми: в смузі 0,5 м від контурного елемента – 11 см, в смузі від 0,5 м до 1 м – 9 см)

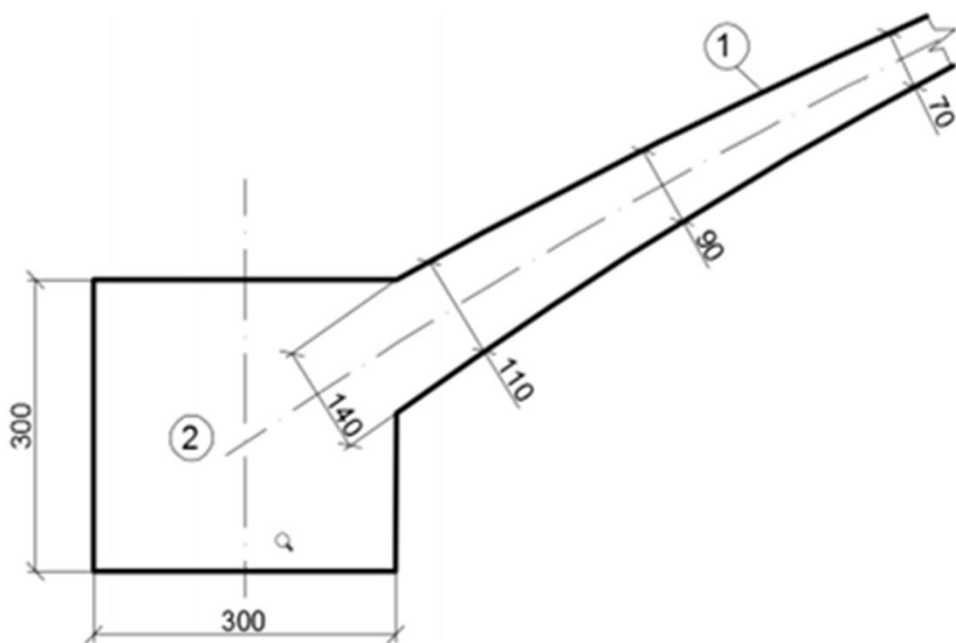


Рис. Примикання оболонки до бортового елемента: 1 – оболонка; 2 – бортовий елемент

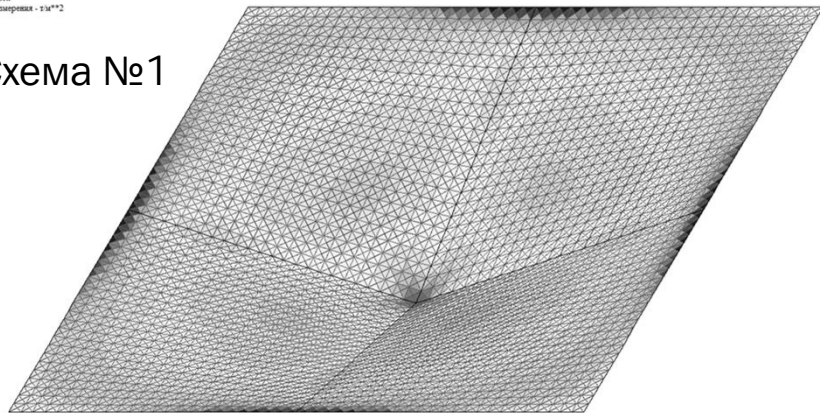


Результати числового експерименту

Головні напруження N1

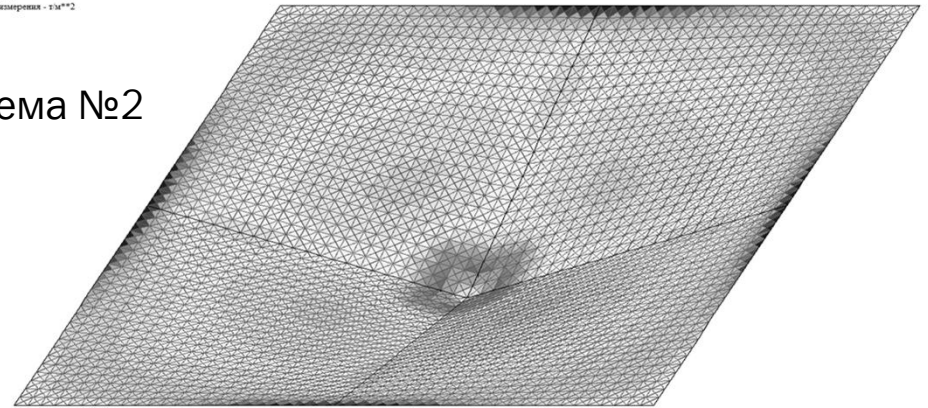
ЛІТЕРА
Завантаження 4
Мозаїка головних напружень N1
Середній слой
Единиця вимірювання - т*м**2

Схема №1



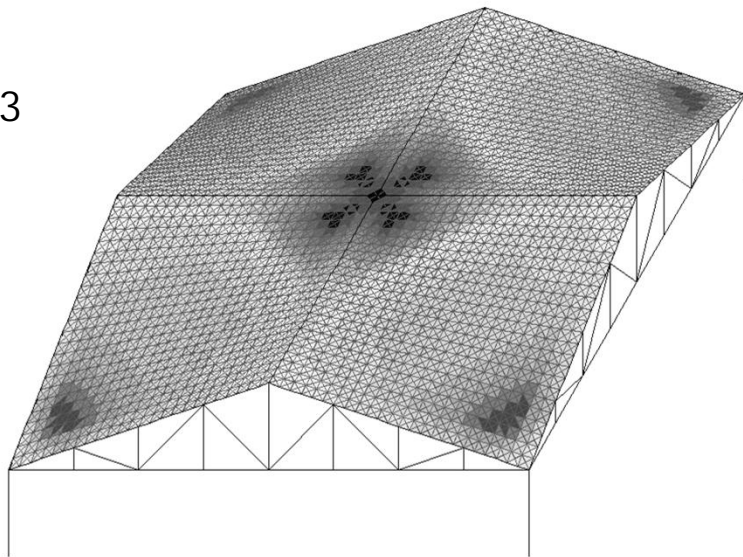
ЛІТЕРА
Завантаження 4
Мозаїка головних напружень N1
Середній слой
Единиця вимірювання - т*м**2

Схема №2



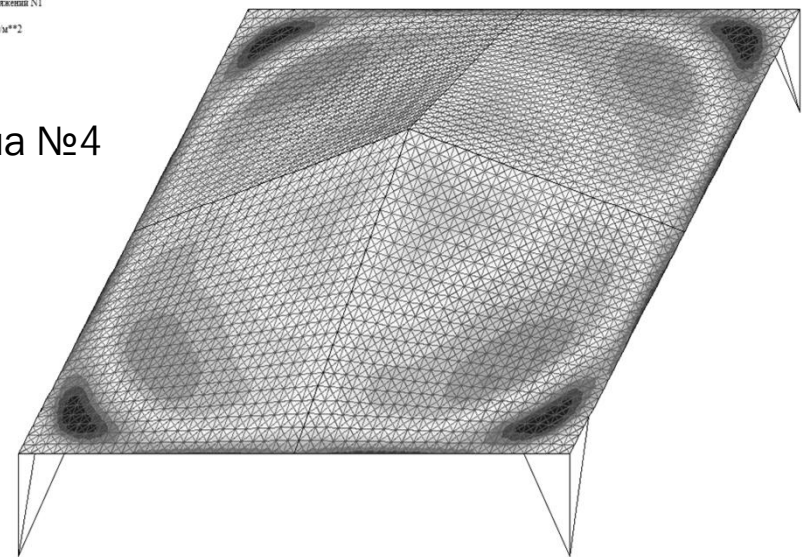
ЛІТЕРА
Завантаження 4
Мозаїка головних напружень N1
Середній слой
Единиця вимірювання - т*м**2

Схема №3



ЛІТЕРА
Завантаження 4
Мозаїка головних напружень N1
Середній слой
Единиця вимірювання - т*м**2

Схема №4



Головні напруження N1 в діагональному перерізі 1/4 поля оболонки

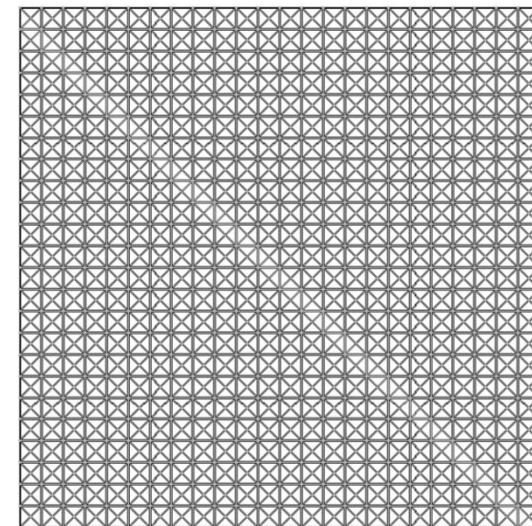
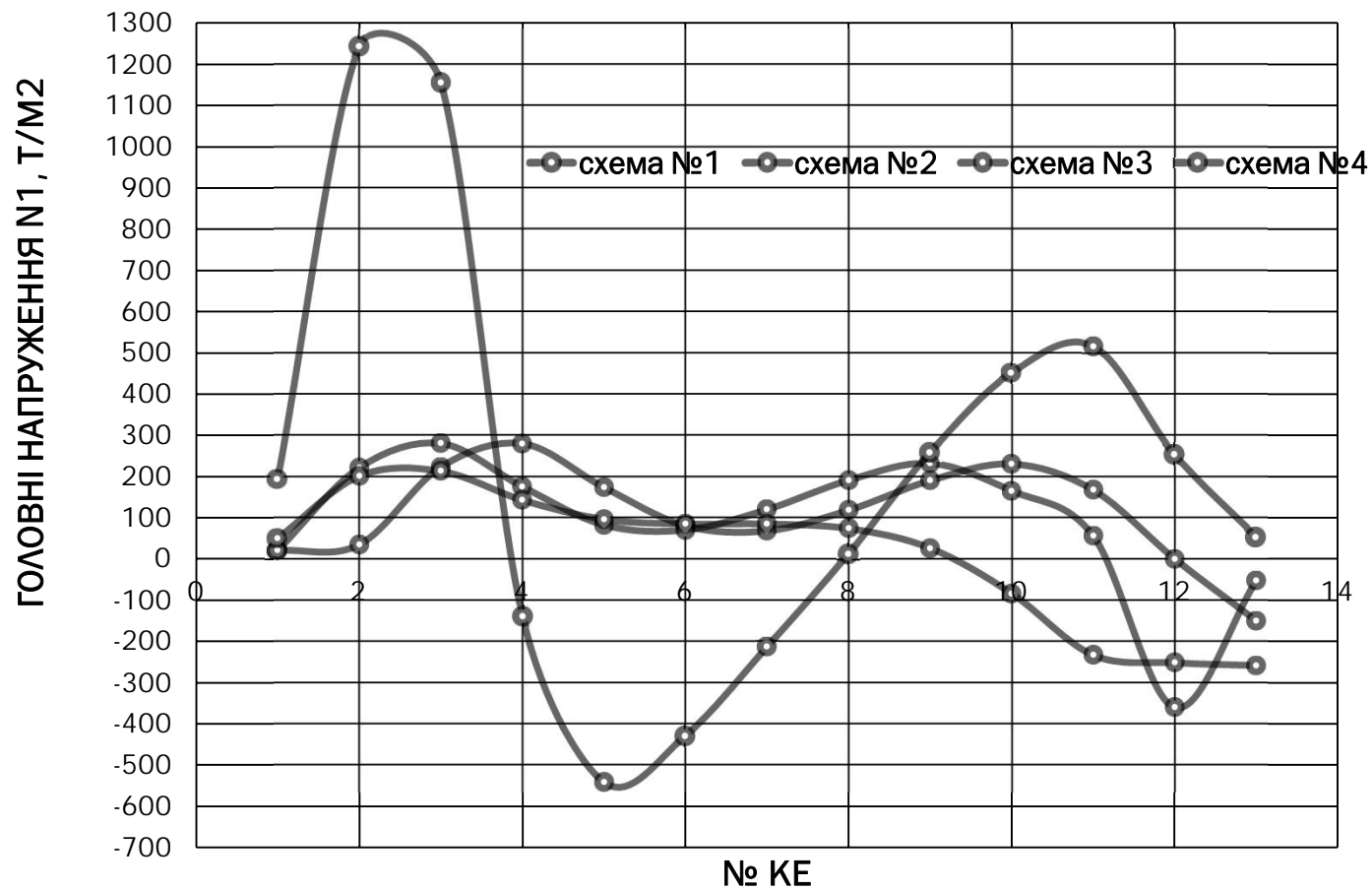
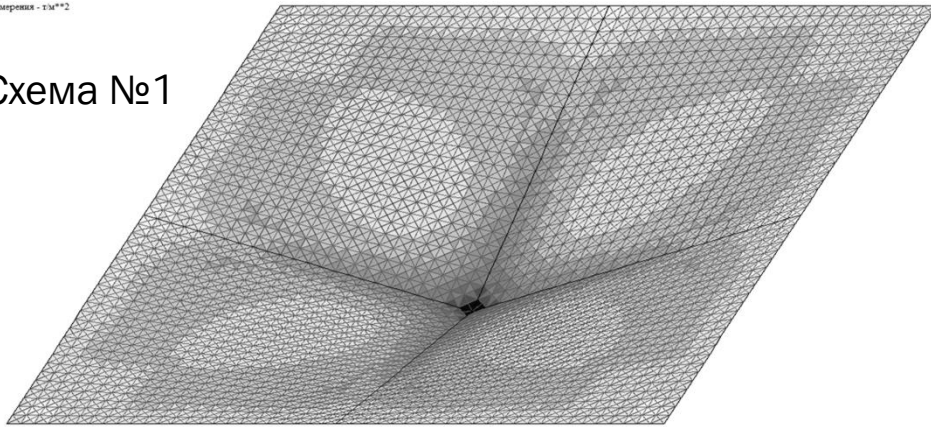


Рис. Діагональний переріз 1-1 1/4 поля оболонки, в якому визначаються головні напруження N1 (Т/м2)

Головні напруження N3

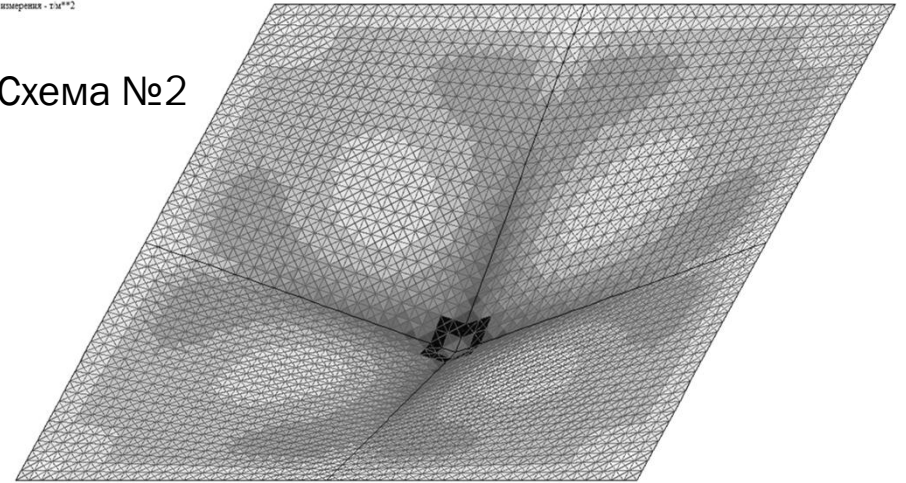
ЛІТЕРА
Завантаження 4
Мозаїка головних напружень N3
Срединний шар
Единиця вимірювання - тлм**2

Схема №1



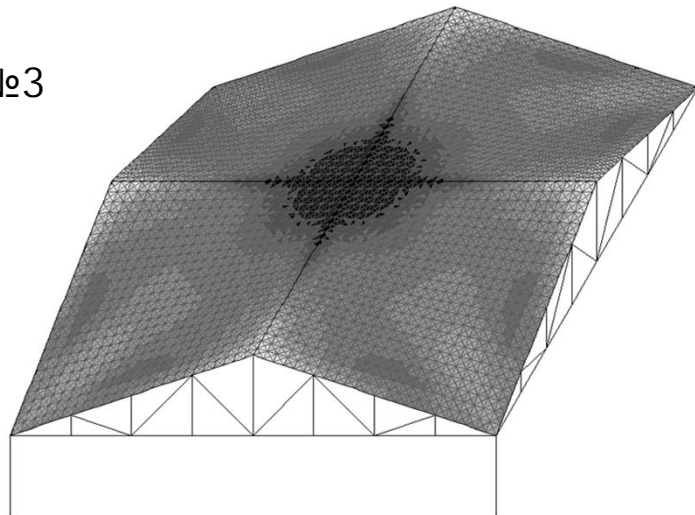
ЛІТЕРА
Завантаження 4
Мозаїка головних напружень N3
Срединний шар
Единиця вимірювання - тлм**2

Схема №2



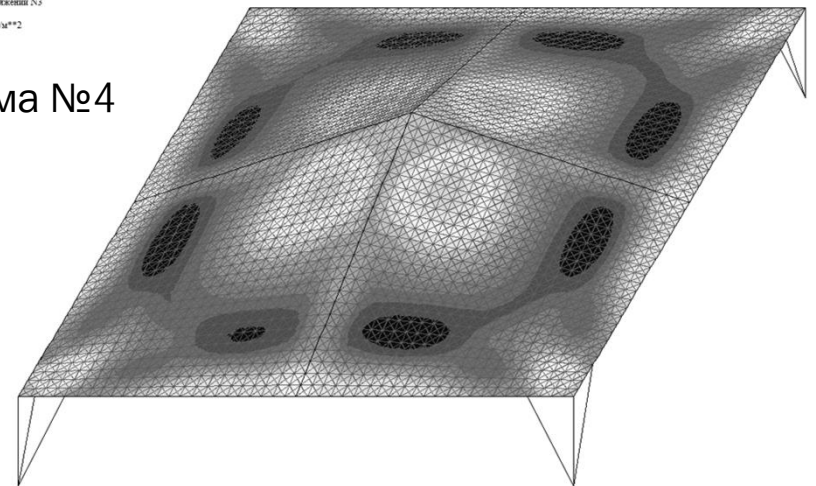
ЛІТЕРА
Завантаження 4
Мозаїка головних напружень N3
Срединний шар
Единиця вимірювання - тлм**2

Схема №3



ЛІТЕРА
Завантаження 4
Мозаїка головних напружень N3
Срединний шар
Единиця вимірювання - тлм**2

Схема №4



z
y
x

z
y
x

Головні напруження N3 в діагональному перерізі 1/4 поля оболонки

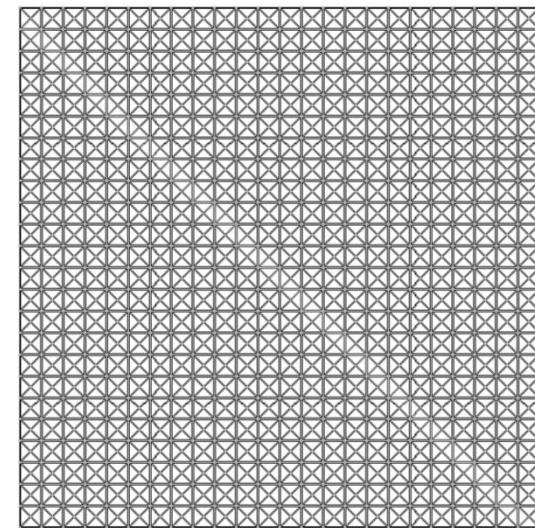
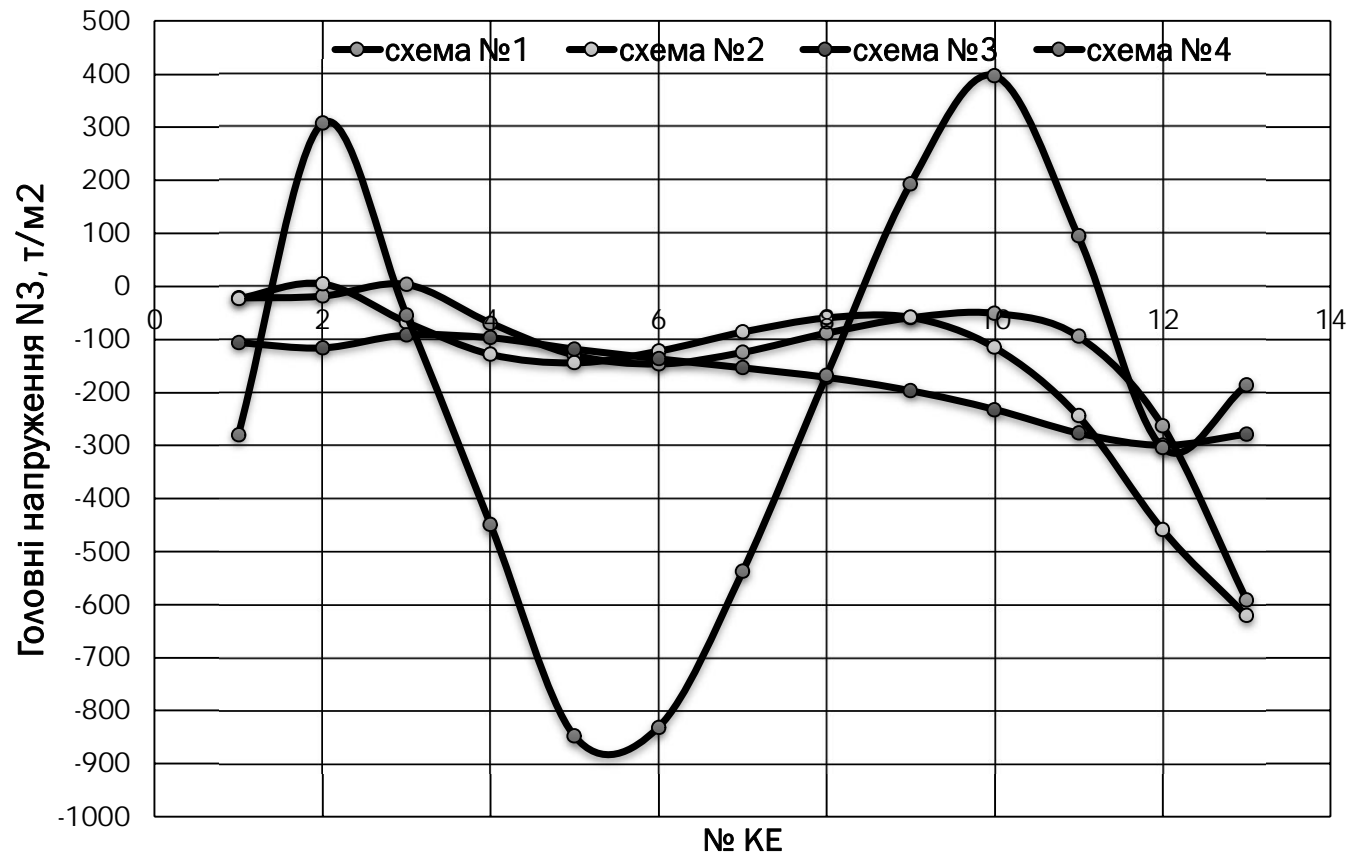


Рис. Діагональний переріз 1-1 1/4 поля оболонки, в якому визначаються головні напруження N1 (т/м2)

Максимальні головні напруження, що виникають в тонкостінній оболонці



З графіку видно, що найменці за модулем розтягуючі головні напруження виникають в тонкостінній оболонці схеми №3 (шатер с торцевими фермами жорсткості), а найбільші- в тонкостінній оболонці схеми №4 (шатер з підкосами).

За напрямком головних напружень N3 лише поле оболонки за схемою №3 є повністю стиснутим, напруження розтягу в ній не виникають.

Армування поля оболонки

- Як видно з графіків головні напруження стиску не перевищують розрахункових опорів бетону на стиск $f_{cd}=14,5$ МПа ($1478,08$ т/м²), але головні напруження розтягу в декілька разів перевищують розрахунковий опір бетону на розтяг $f_{ctd}=1,0$ МПа ($101,9$ т/м²).
- Тому за величинами головних напружень розтягу за нормами ДБН В.2.6-98:2009 [14] з використанням модуля Ларм-САПР 2013 була підібрана робоча арматура для чотирьох моделей оболонок, що досліджуються.

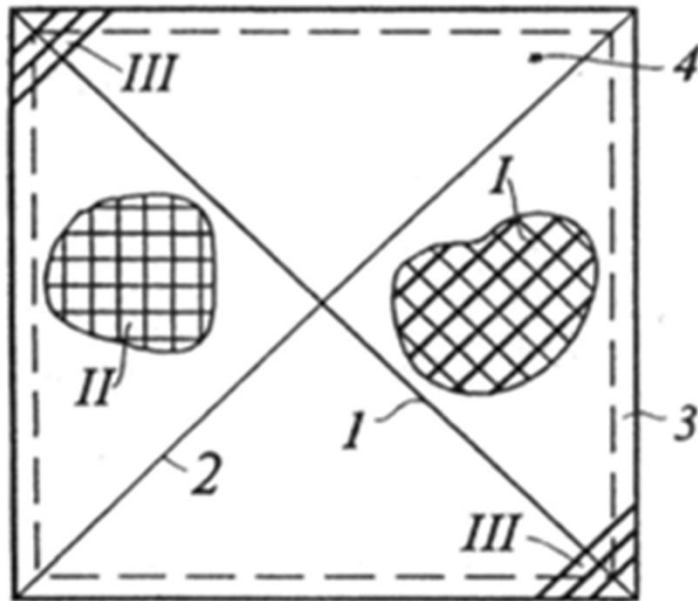


Рис. Схеми армування гіпару:

- I – сітка зі стрижнями уздовж діагоналей; II – сітка зі стрижнями уздовж контурних елементів; III – додаткова арматура в кутових зонах;
1 – опукла головна парабола; 2 – увігнута головна парабола; 3 – бортовий елемент; 4 – власне оболонка

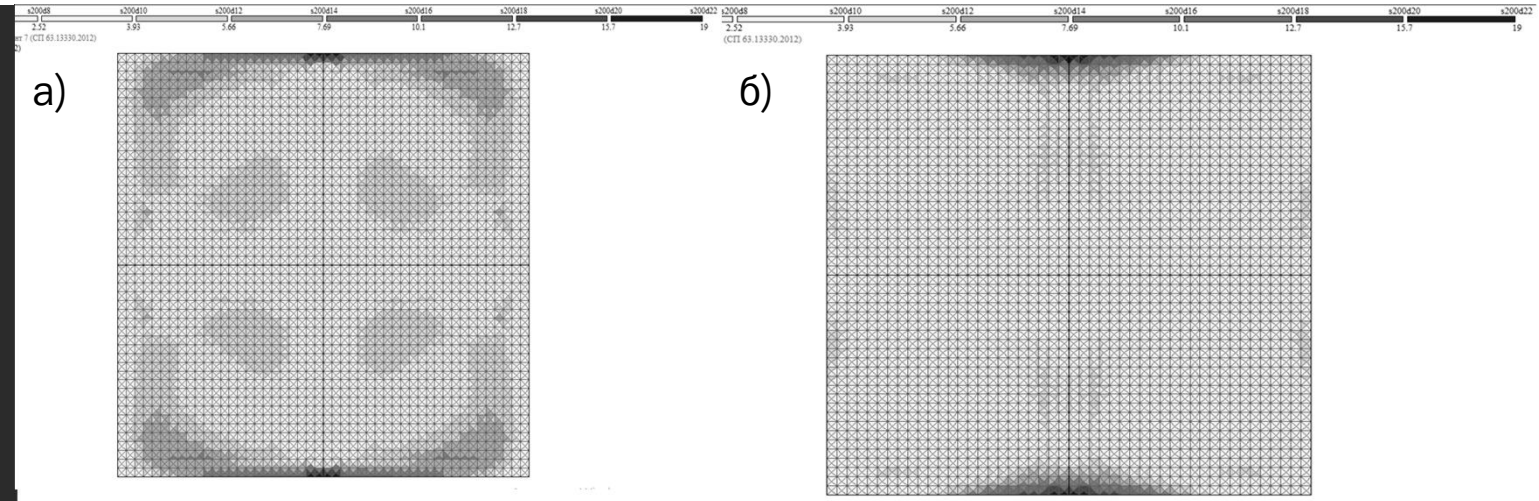


Рис.1 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі Х для схеми №1

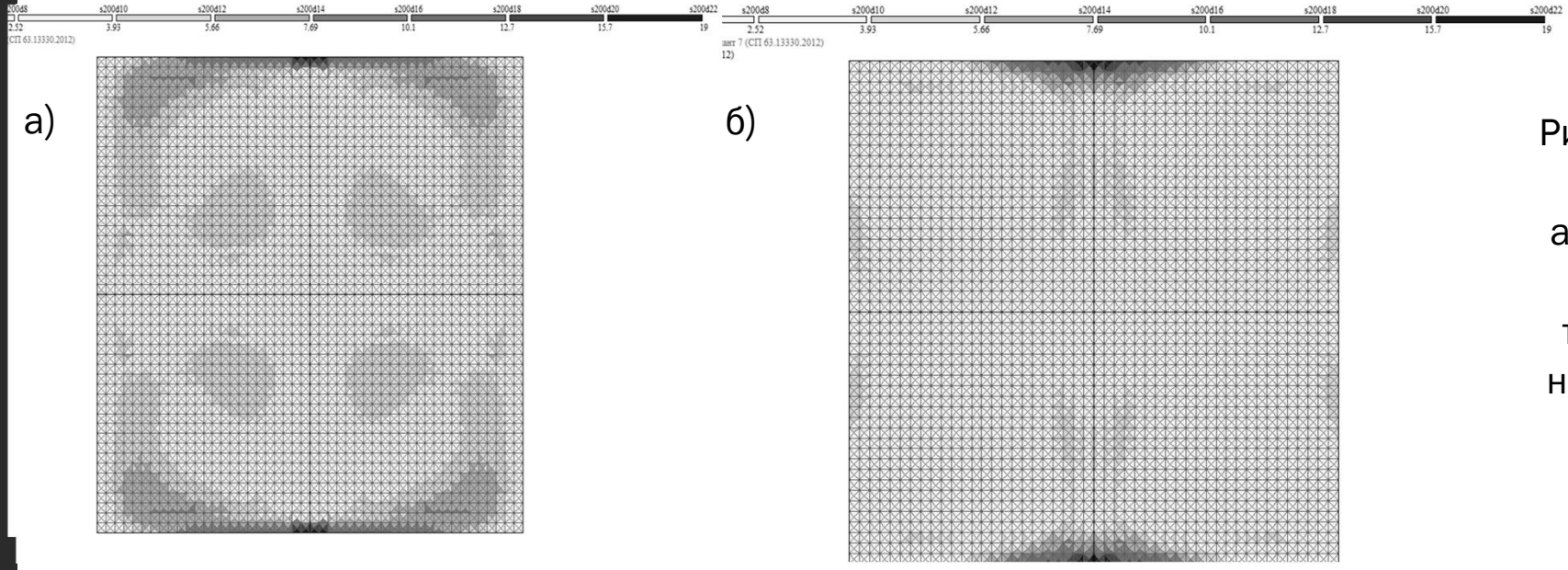


Рис.2 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі Х для схеми №2

Арматура за напрямком армування по осі «Х»

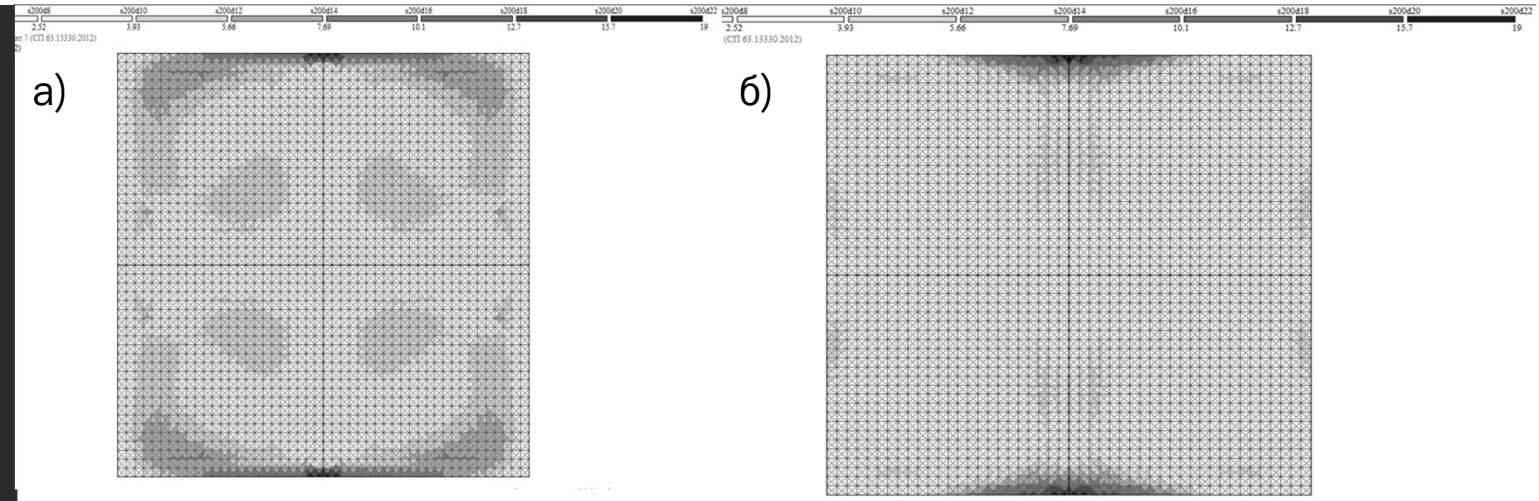


Рис.1 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі Х для схеми №3

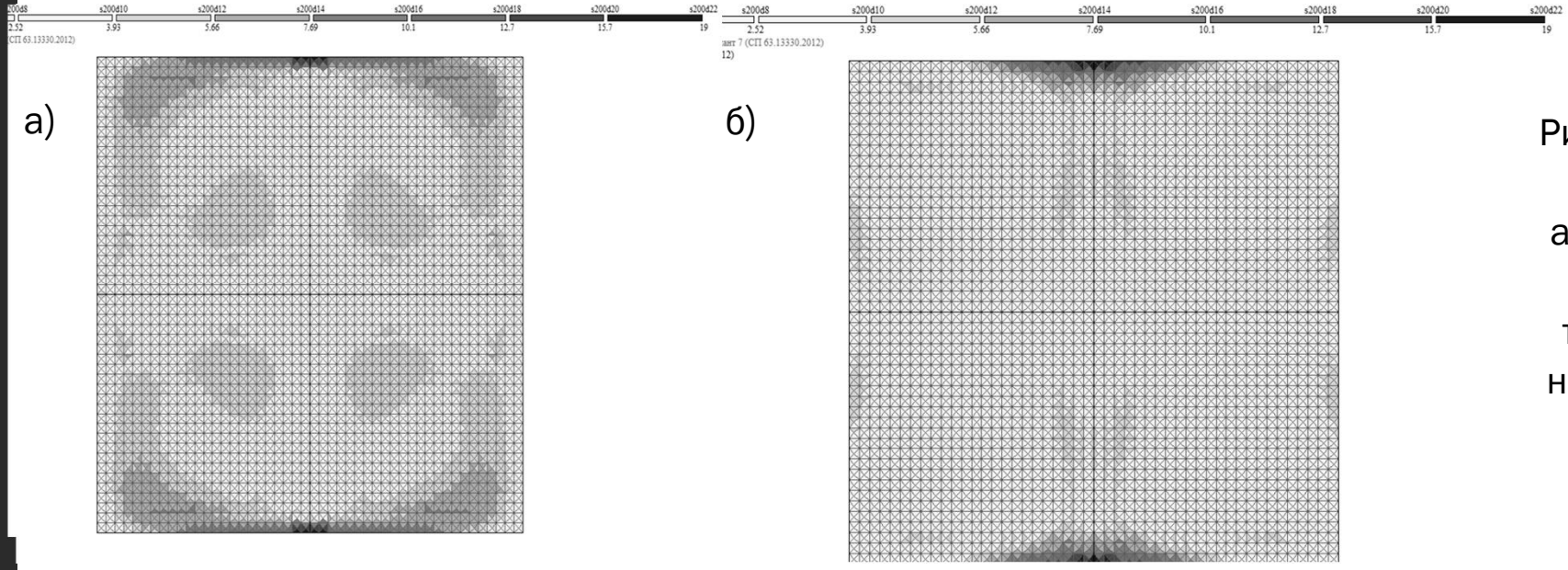


Рис.2 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі Х для схеми №4

Арматура за напрямком армування по осі «Х»

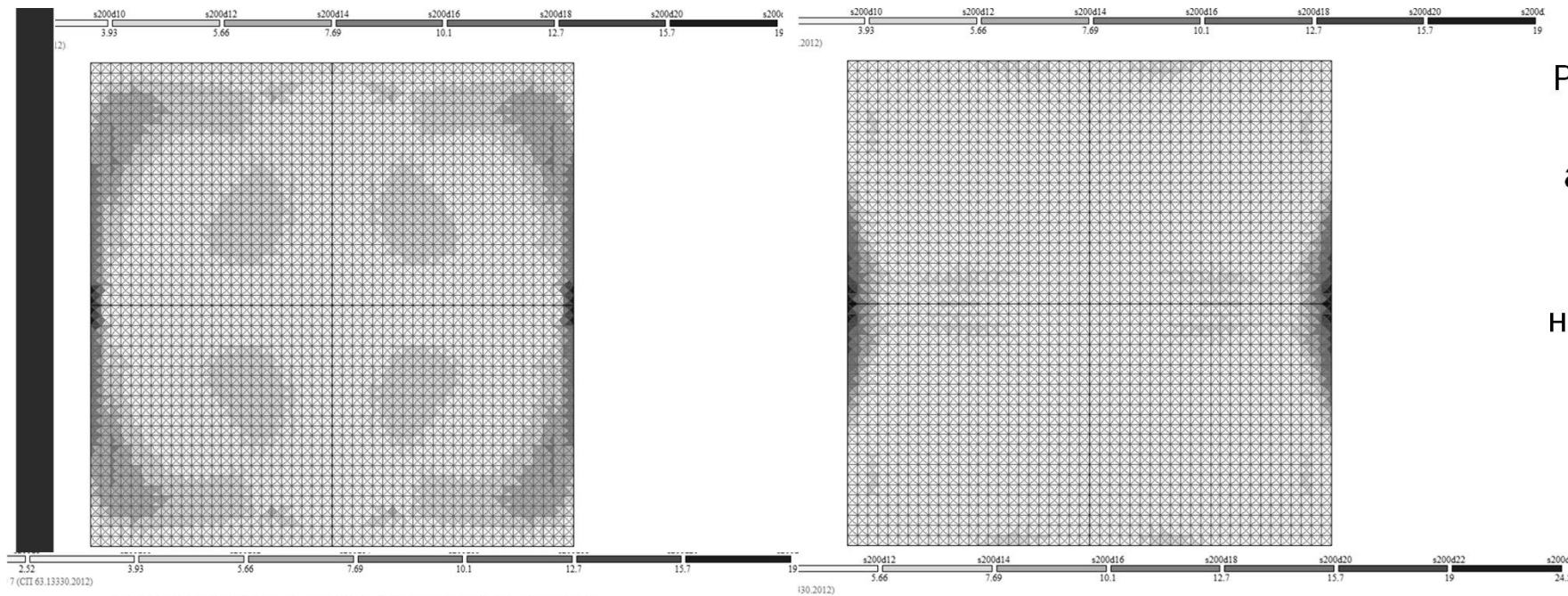


Рис.3 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі «У» для схеми №1

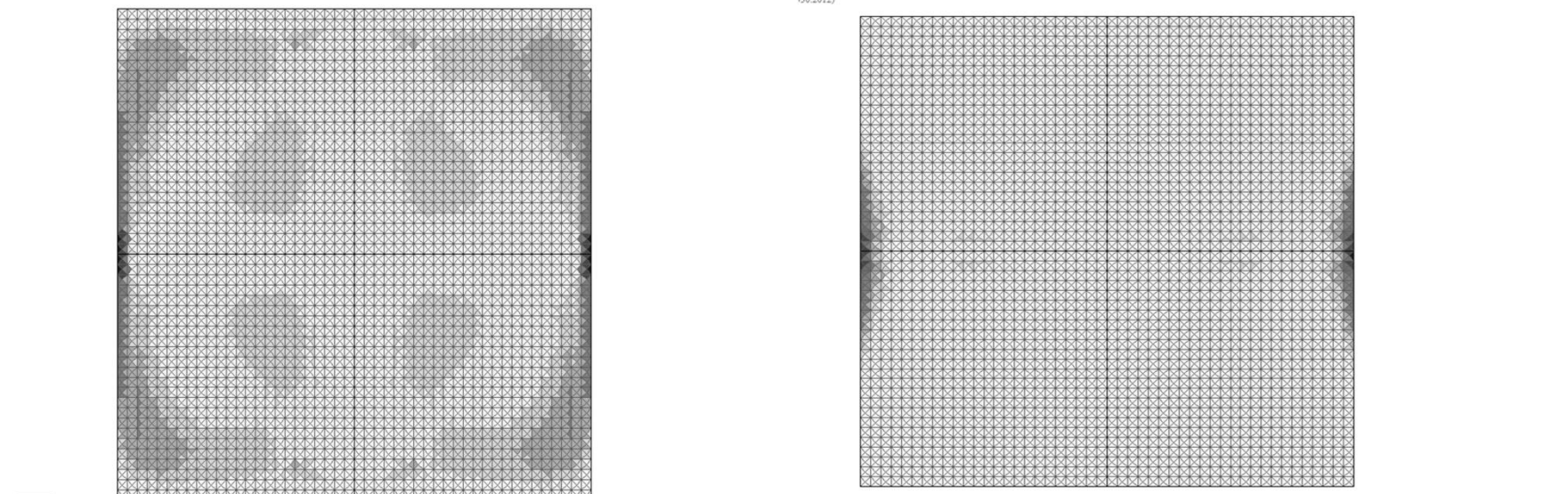


Рис.4 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі «У» для схеми №2

Арматура за напрямком армування по осі «У»

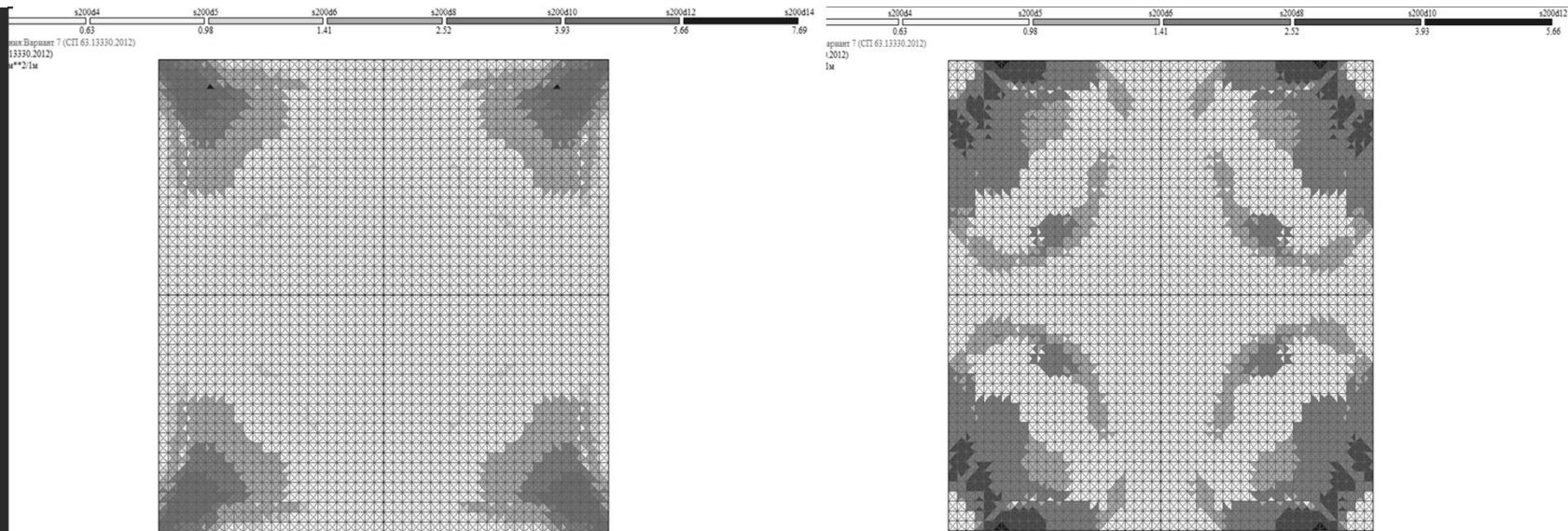


Рис.3 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі «У» для схеми №3

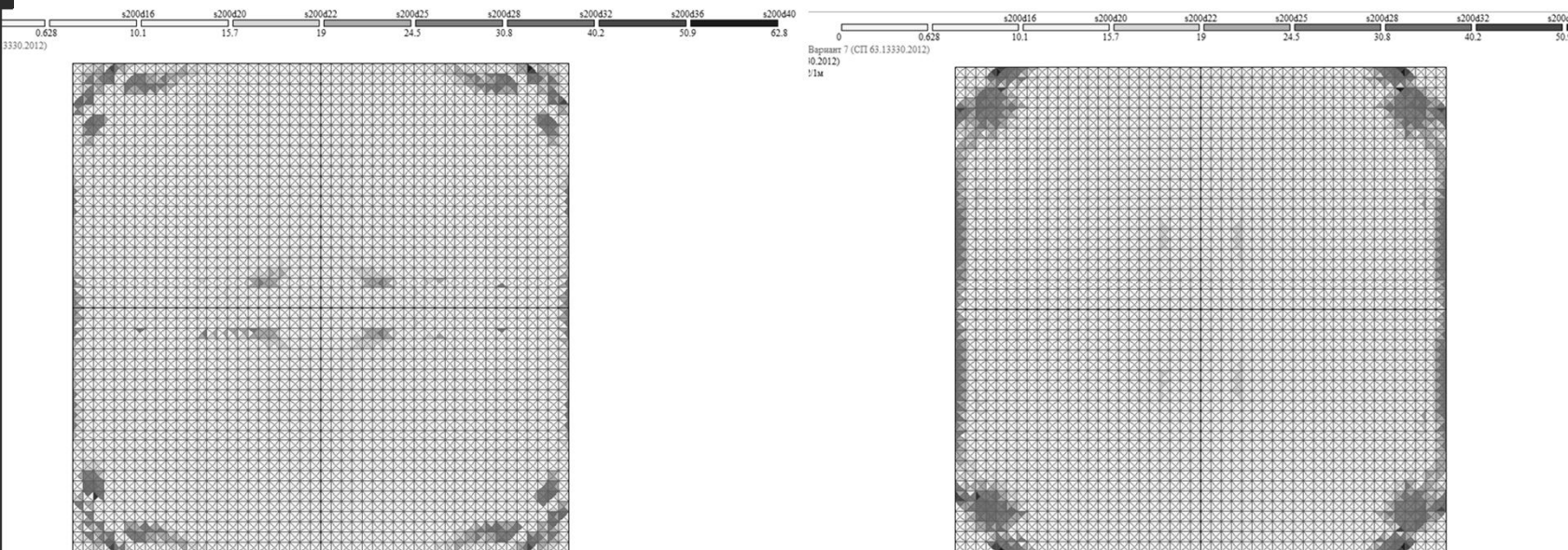


Рис.4 Площа верхньої (а) та нижньої (б) арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості за напрямком осі «У» для схеми №4

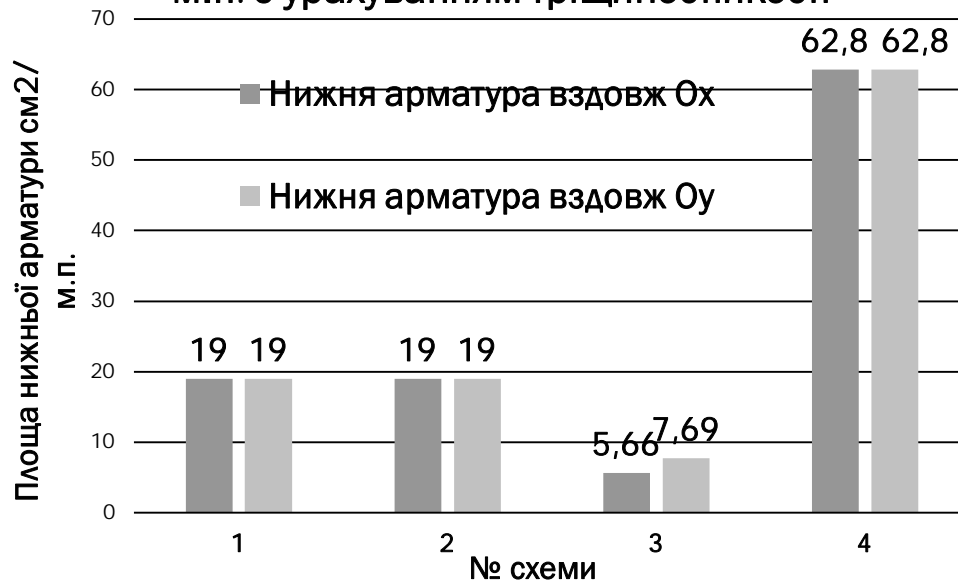
Арматура за напрямком армування по осі «У»

Таблиця .Максимальне армування, (м2/м.п.)

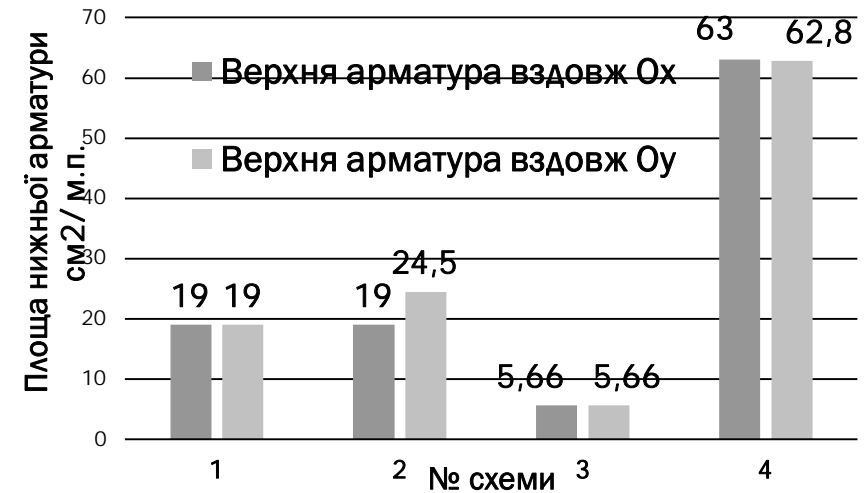
№ схеми	Армування вздовж осі $X_1, \text{см}^2/\text{м.п.}$		Армування вздовж осі $Y_1, \text{см}^2/\text{м.п.}$	
	Нижня арматура	Верхня арматура	Нижня арматура	Верхня арматура
1	19	19	19	19
2	19	19	19	24,5
3	5,6	5,66	7,69	5,66
4	62,8	63	62,8	62,8

Як видно із графіків найбільших витрат арматурної сталі потребує оболонка за схемою №4, оскільки напруження розтягу в ній є максимальними й виникають за обома напрямками дії головних напружень N_1 та N_3 . Найменшої інтенсивності армування, а значить і витрат арматурної сталі, потребує оболонка за схемою №3. В цій оболонці за напрямками дії головних напружень N_3 розтягуючі напруження відсутні, в цьому напрямку оболонка працює лише на стиск

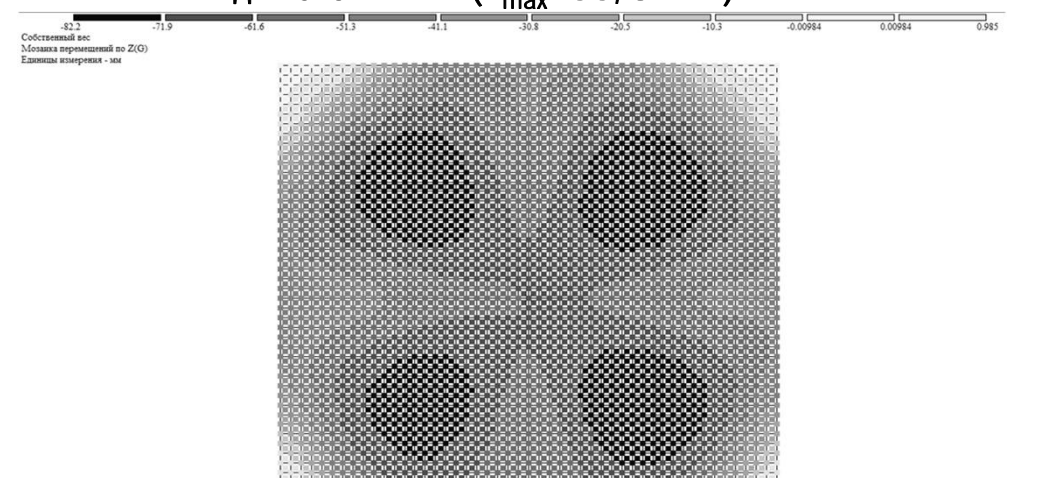
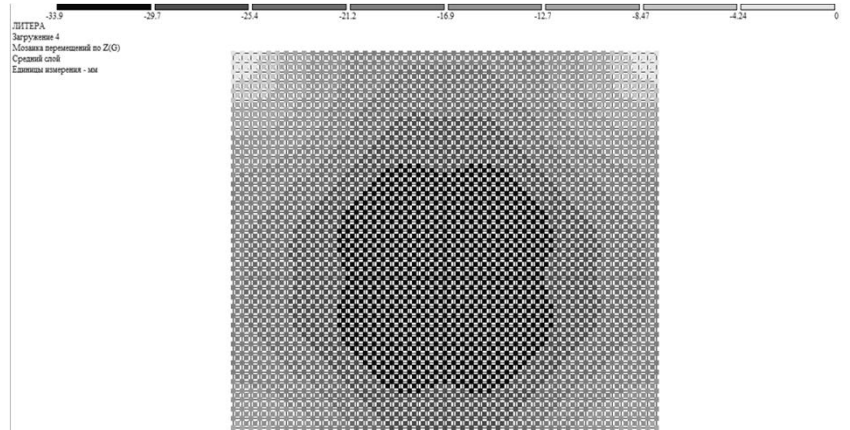
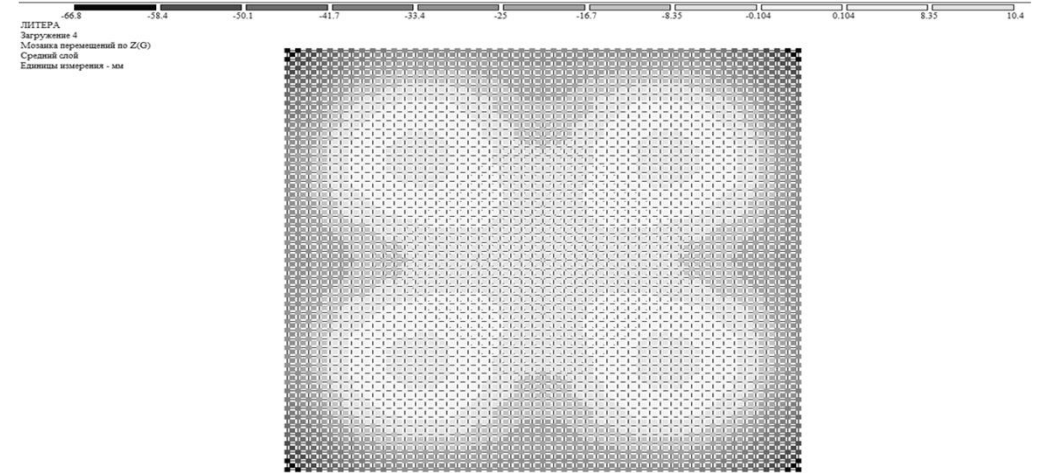
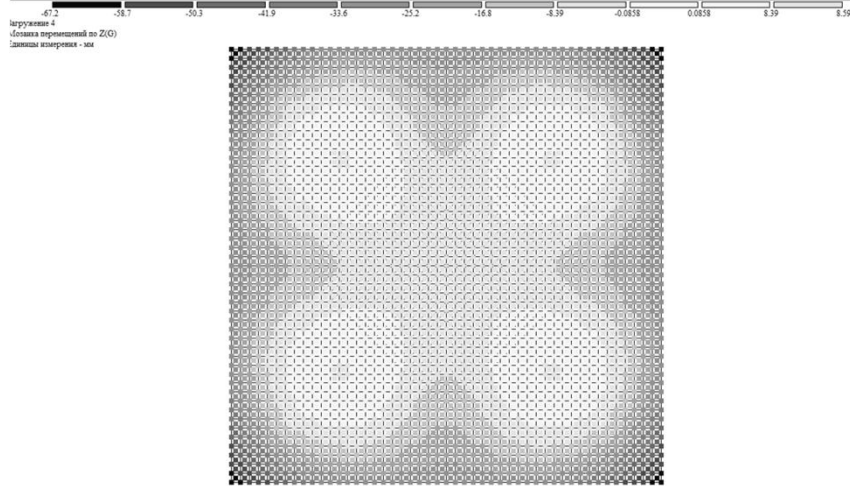
Максимальні значення площі нижньої арматури (см²) на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості



Максимальні значення площі верхньої арматури (см²) на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості



Деформативність оболонок



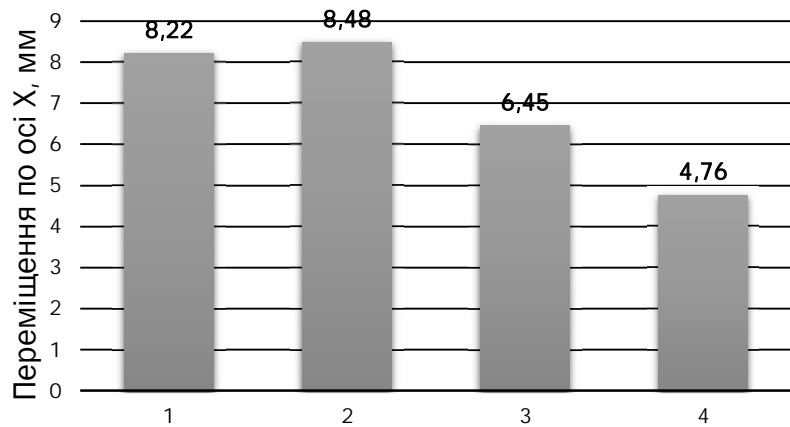


Рис.1 Максимальні значення переміщень вузлів схеми вздовж осі X

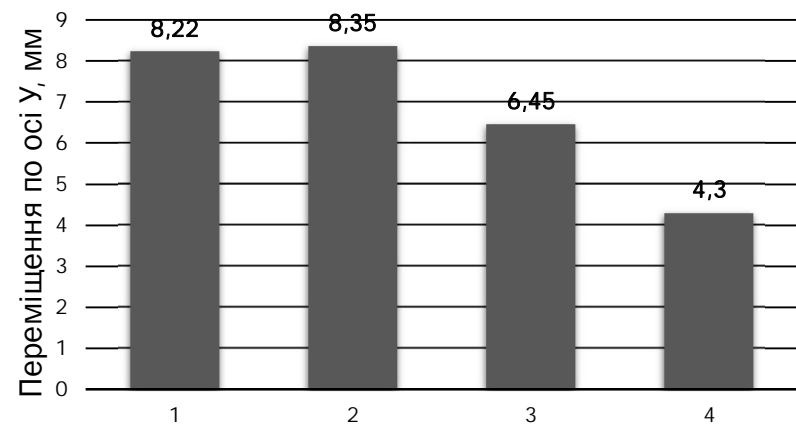


Рис.1 Максимальні значення переміщень вузлів схеми вздовж осі Y

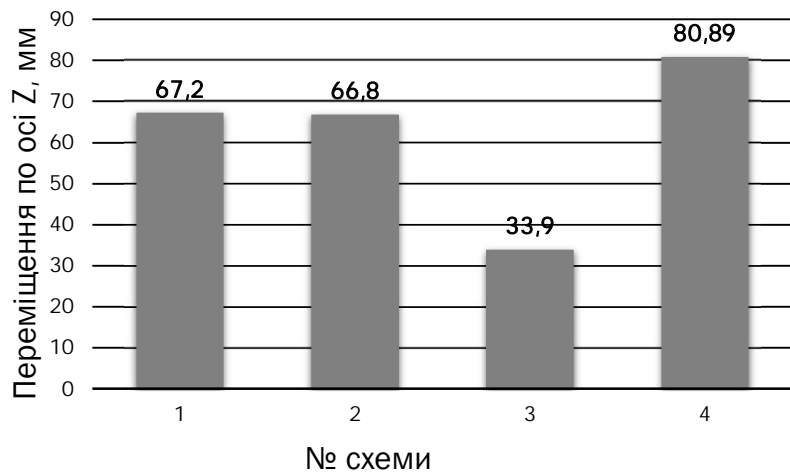
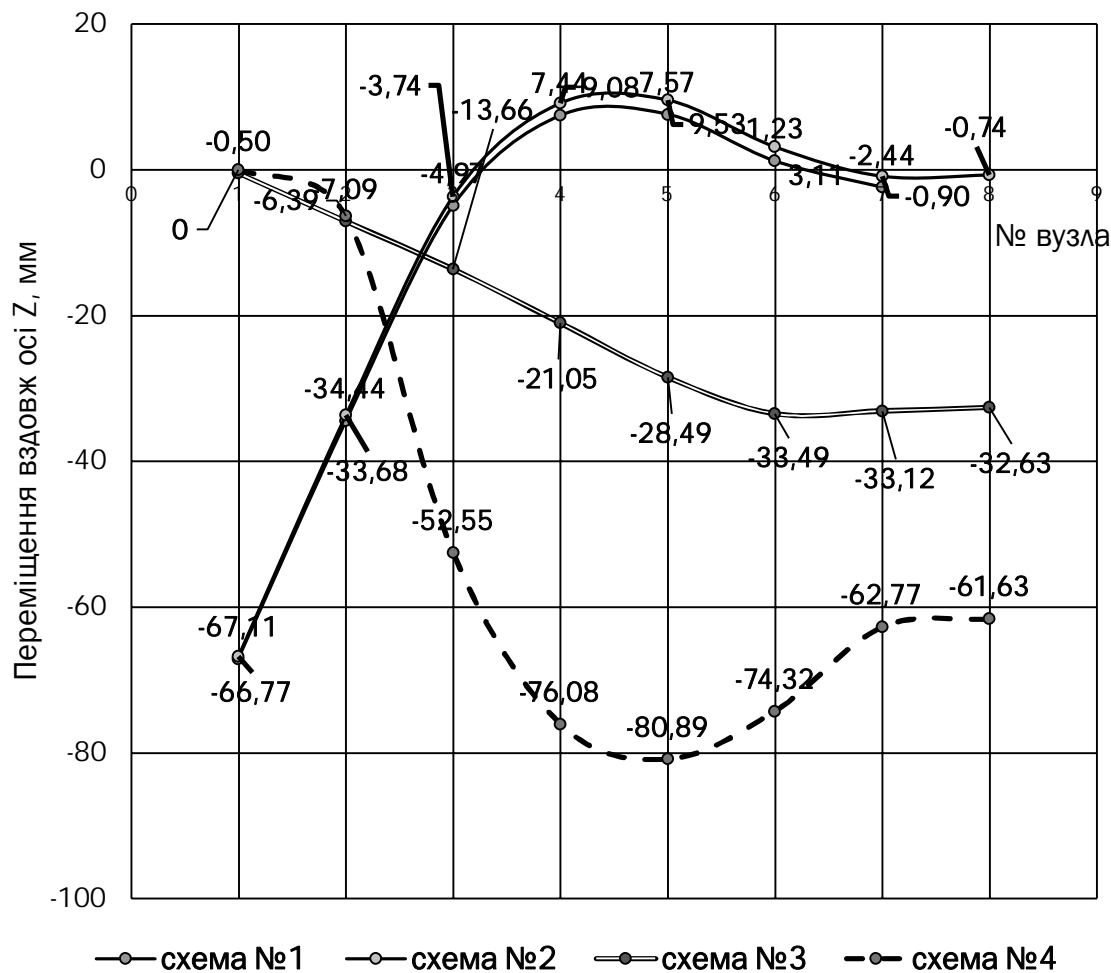


Рис.3 Максимальні значення переміщень вузлів схеми вздовж осі Z

Таблиця 1. Максимальні переміщення вузлів схем

№ схеми	Переміщення вузлів розрахункових схем, мм		
	вздовж O_x	вздовж O_y	вздовж O_z
1	8,22	8,22	67,2
2	8,48	8,35	66,8
3	6,45	6,45	33,9
4	4,77	5,09	82,2



В цілому всі величини максимальних вертикальних прогинів знаходяться в допустимих межах для оболонок за схемами 1–3. Але, максимальне переміщення по вертикалі для схеми № 4 перевищує гранично допустиме допустиме в 2,0 рази: $f_z = \frac{l}{300} = \frac{2400}{300} = 8,0$ см

Для обох типів оболонок типу «гриб» вертикальні погини конструкції є майже однаковими, тобто наявність додаткових опорних колон ніяк не впливає на збільшення жорсткості конструкції в цілому.

Найменші переміщення виникають в схемі №3, в гіпарі типу «шатер», що має торцеві діафрагми жорсткості у вигляді ферм із профілів типу «Молодечно».

Найбільші понаднормові вертикальні прогини мають місце в схемі №4 –схемі шатрового типу, що спирається в кутах на стійки з підкосами. Але, очевидно, не підсилення країв конструкції значним чином збільшує деформативність оболонок типу «шатер з підкосами»

ВИСНОВКИ

- 1. Складені на квадратному плані оболонки типу гіпарів з прямолінійними краями, що збігаються з твірними поверхні, є архітектурно виразними та ефективними з точки зору статичної роботи конструкціями.
- 2. Прийнято до аналізу чотири оболонки гіперболічного типу на квадратному плані 24x24 м за формою «гриб» та формою «шатер». Базова поверхня гіпару для всіх моделей є однаковою та описується формулою:

$$Z = f \cdot x \cdot y / (a \cdot b) = 4xy / (12^2) = xy / 36.$$

- Лише з'єднання під різними кутами базового гіпару (що являє собою $\frac{1}{4}$ всієї поверхні оболонки) створює різні за характером роботи складені гіперболічні поверхні.
- 3. Опуклі твірні параболи оболонки працюють подібно аркам на стиск, а увігнуті зони – на розтягнення подібно гнучким ниткам, тому було перевірено стиснуті зони оболонки на стійкість. Перевірка стійкості оболонок типу «гриб» (схема №1 та №2) показала, що їх стійкість забезпечена. Перевірка стійкості оболонок типу «шатер» при мінімальній товщині стиснутої зони в 5 см виявилися не достатньо, але при збільшенні цієї товщини до 7 см умова стійкості виконалася.

- 4. За результатами статичного розрахунку від розрахункового сполучення навантажень (власна вага залізобетонної оболонки, покрівля, сніг на все поле) чотирьох моделей були отримані наступні висновки:
- 4.1 Головні напруження як стиску, так і розтягу, що обумовлюють конструктивне вирішення тонкостінної оболонки, розподілені по її полю плавно.
- 4.2 Головні напруження стиску для усіх моделей не перевищують розрахунковий опір бетону на стиск $f_{cd} = 14,5$ МПа ($1478,08$ т/м²). Найбільші стискаючі головні напруження виникають за напрямком головних напружень №3 в схемах оболонок №1 («гриб») та №4 («шатер з підкосами») та дорівнюють відповідно 1170 т/м² та 1180 т/м². В оболонці за схемою № 2 («гриб з похилими стійками») максимальні напруження стиску є меншими в 2 рази за розрахунковий опір бетону на стиск.
- 4.3 У всіх розрахункових моделях, окрім моделі №3, за напрямком головних напружень розтягу №3 виникають розтягуючі напруження. За цим напрямком оболонка за схемою №3 є повністю стиснутою, головні напруження розтягу в ній відсутні.
- Величини цих напружень розтягу не перевищують допустимого розрахункового опору бетону класу С 20/25 на розтяг $f_{ctd} = 1,0$ МПа = $101,9$ т/м² для оболонок за схемами №1 та №2, але для оболонки за схемою №4 вони становлять 415 т/м² та перевищують опір бетону на розтяг в 4 рази.
- 4.4 За напрямком головних напружень №1 всі оболонки зазнають напружень розтягу, які перевищують в декілька разів розрахунковий опір бетону на розтяг. Так для схем №1 та №2 ці напруження перевищують опір бетону на розтяг у 8 разів, а для схеми №4-в 15,8 разів. Найменші напруження розтягу виникають в оболонці №3, де таке перевищення складає 2,3 рази.
- 4.5 Найбільш раціональною з точки зору виникнення та розподілу головних напружень розтягу є оболонка за схемою №3. Очевидно, що наявність торцевих діафрагм жорсткості у вигляді сталевих ферм значним чином зменшує в тілі оболонки як напруження стиску, так, що головне, і напруження розтягу. Найменші за модулем і такі, що діють лише за одним напрямком головних напружень, напруження розтягу дозволяють суттєво зекономити арматуру при армуванні поля оболонки.

- 5. За величинами головних напружень розтягу за нормами ДБН В.2.6-98:2009 з використанням модуля Ларм-САПР 2013 були обчислені площі нижньої та верхньої арматури на 1 м.п. з урахуванням тріщиностійкості
- 5.1 Як по осі X , так і по осі Y площі нижньої та верхньої арматури на 1 м.п. для схем №1 та №2 є однаковими та максимальне їх значення становить $19 \text{ см}^2/\text{м.п.}$ Для схеми №3 такі максимальні значення площі арматури є найменшими та становлять $5,66-7,7 \text{ см}^2/\text{м.п.}$
- Найбільші максимальні значення площі верхньої та нижньої арматури за напрямками X та Y мають місце для схеми № 4 та становлять $63 \text{ см}^2/\text{м.п.}$
- Такі дані щодо витрат арматури вказують на шатрову оболонку за схемою №3 як на найбільш ефективну.
- 6. Деформативність у вертикальному напрямку для оболонок за схемами №№1-3 є в допустимих межах та не перевищує гранично допустимого значення, а для схеми №4 максимальний прогин від навантаження є в 2 рази більшим за гранично допустимий.
- 7. За критерієм найменших головних напружень, найменших вертикальних прогинів та найменших витрат арматурної сталі найбільш ефективним є гіперболічний параболоїд шатрового типу (схема №3), а найбільш не раціональною з точки зору роботи та конструювання є поверхня оболонки за схемою № 4- шатер з підкосами.



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

