

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

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
Будівельних конструкцій

/...../

підпис

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

**На тему: «Дослідження роботи структурної плити в залежності
від форми базового елемента»**

Виконав (ла)

(підпис)

Олефір Ю.М.

(Прізвище, ініціали)

Група

(Науковий)

керівник

(підпис)

Срібняк Н.М.

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2024 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: будівельних конструкцій

Спеціальність: 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Олефір Юрій Миколайович

Тема роботи: Дослідження роботи структурної плити в залежності від форми базового елемента

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

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

Вихідні дані до роботи:

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

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

Виконати огляд джерел щодо особливостей роботи та проектування структурних плит. Створити СЕ моделі трьох структурних плит покриття , що мають один відмінний параметр-форму базового формоутворюючого елементу.. Оцінити вплив форми базового елемента на параметри НДС. Підрахувати вагу моделей згідно прийнятих профілів стержнів. Сформулювати висновки.

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

Мультимедійна презентація в форматі Microsoft PowerPoint

Керівник :



(підпис)

Н.М. Срібняк

(Прізвище, ініціали)

Консультант



(підпис)

О.П. Луцьковський

(Прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання:

Здобувач

(підпис)

Ю.М. Олефір

(Прізвище, ініціали)

Анотація

Олефір Юрій Миколайович. Дослідження роботи структурної плити в залежності від форми базового елемента – Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

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

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

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

Результати досліджень надають можливість за результатами числових експериментів за зміни лише одного критерію – форми базового елемента просторової стержньової структурної плити покриття виявити напружено-деформований стан конструкції, її конструктивне вирішення й, врішті-решті матеріалоемність конструкції..

Аналіз публікацій та досліджень встановив, що вивчення факторів, що призводять до зміни (перерозподілу) зусиль в елементах структурної плити є актуальною та важливою задачею, оскільки таке регулювання дозволяє «вирівнювати» осьові зусилля в стержнях верхнього, нижнього поясу та решітки. Оптимізація статичної роботи конструкції полягає в тому, що методи конструювання дозволяють досягти рівномірного розподілення та якомога більшої рівності (за модулем) значень осьових зусиль в стержнях верхнього

(нижнього) поясу структурної плити покриття. Рівномірний розподіл передбачає також, одночасно, й зменшення цих зусиль за модулем.

В **основній частині** наведено опис трьох скінченоелементних схем структурної плити покриття з розміром в плані 12,0x24,0 м. Плита має два пояси у вигляді горизонтальних площин із стержнів, що утворюють прямокутну сітку. Конструкція спирається на колони в чотирьох кутах. Кожна з трьох моделей утворена мультиплікацією певного типу базового (одиночного) елемента вздовж осей горизонтальної площини.

Три розрахункові схеми мають однакові параметри та відрізняються лише типом базового (одиночного) елемента.

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

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

У **висновках** встановлено, що форма базового елемента, що формоутворює плиту, значним чином впливає на напружено-деформований стан її стержньових елементів, а значить – й на параметри конструювання певної моделі. Конструктивне вирішення моделі обумовлює її вагу. Отже, виконавши числовий експеримент, можна визначити найбільш ефективну модель за критерієм матеріалоемності з декількох можливих.

Ключові слова: структурна просторова плита, регулятори зусиль, базовий елемент, одиночний елемент, сталеві конструкції, матеріалоемність

Список публікацій та/або виступів на конференціях студента:

Олефір Ю.М., Срібняк Н.М. Дослідження роботи структурної плити в залежності від форми базового елемента // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції

студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (18-22 листопада 2024 р.) – Суми, 2024.

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

Структура роботи. Робота складається з основного тексту на 46 сторінках, у тому числі 15 таблиць, 38 рисунків. Текст роботи містить 6 розділів, що включають загальну характеристику роботи й висновки, список з 21 джерел, 2 додатків на 28 сторінках. Графічна частина складається з 24 слайдів мультимедійної презентації.

Abstract

Olefir Yurii Mykolaiovych. Study of the structural slab performance depending on the shape of the base element – 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 table of contents, general characteristics of the work and its qualification features, a review of research on the chosen topic, sections of the main part, conclusions based on the results of research and formulations of research prospects (in Ukrainian and English).

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

The **research results** make it possible to identify the stress-strain state of the structure, its constructive solution and, ultimately, the material consumption of the structure, based on the results of numerical experiments, by changing only one criterion - the shape of the basic element of the spatial core structural slab of the pavement.

An **analysis of publications** and research has established that studying the factors that lead to a change (redistribution) of forces in the elements of the structural slab is an urgent and important task, since such regulation allows 'levelling' the axial forces in the rods of the upper, lower belt and lattice. Optimisation of the static performance of the structure means that design methods allow achieving a uniform distribution and the greatest possible equality (modulo) of the axial forces in the rods of the upper (lower) belt of the structural slab. Uniform distribution also implies, at the same time, a reduction in these modulus forces.

The **main part** of the paper describes three finite element models of a structural slab with a plan dimension of 12.0 x 24.0 m. The slab has two belts in the form of horizontal planes of rods forming a rectangular grid. The structure is supported by columns in the four corners. Each of the three models is formed by multiplying a certain type of basic (unit) element along the axes of the horizontal plane.

The three design models have the same parameters and differ only in the type of basic (unit) element.

As a result of the static analysis, the stress-strain state of the three models is compared.

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

The **conclusions** show that the shape of the basic element that forms the slab significantly affects the stress-strain state of its core elements, and therefore the design parameters of a particular model. The design solution of the model determines its weight. Thus, by performing a numerical experiment, it is possible to determine the most efficient model in terms of material consumption from several possible ones.

Keywords: structural spatial plate, force regulators, basic element, unit element, metal structures, material consumption.

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

Olefir Y.M., Sribniak N.M. Study of the work of a structural slab depending on the shape of the base element // Proceedings of the All-Ukrainian Scientific Conference of Students and Postgraduates dedicated to the International Student's Day (18-22 November 2024) - Sumy, 2024.

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

Structure of work. The paper consists of the main text on 46 pages, including 15 tables and 38 figures. The text of the paper contains 6 chapters, including a general description of the work and conclusions, a list of 21 references, 2 appendices on 28 pages. The graphic part consists of 24 slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

| | |
|--|--|
| Завдання..... | |
| Анотація..... | |
| РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА | |
| РОБОТИ..... | |
| 1.1 Актуальність теми | |
| РОЗДІЛ 2. БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ..... | |
| 2.1 Розвиток проектування структурних конструкцій | |
| РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ..... | |
| РОЗДІЛ.4 МОДЕЛЮВАННЯ СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНИХ СХЕМ В | |
| РАМКАХ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ..... | |
| 4.1 Алгоритм проведення числового експерименту в ПК ЛПРА-САПР..... | |
| 4.2 Скінченоелементна модель плити структурного типу..... | |
| 4.3 Вплив форми одиничного (базового елемента) на напружено-деформованого стану стержнів структурної плити | |
| 4.4 Граничні умови, які призначено для схем плити. Призначення параметрів жорсткості стержнів..... | |
| 4.5 Навантаження, що прийнято..... | |
| РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ..... | |
| 5.1 Деформативність розрахункових моделей..... | |
| 5.2 Напружений стан моделей, що досліджуються..... | |
| 5.3 Підбір нових перерізів стержнів для груп конструктивних елементів моделей, що досліджуються..... | |
| РОЗДІЛ 6. ВИСНОВКИ | |
| Література..... | |
| Додатки..... | |
| Додаток 1.Тези доповіді на конференції | |
| Додаток 2.Графічний матеріал (презентація) | |

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

1.1 Актуальність теми

Структурні плити, які мають плоску або криволінійну поверхню, можна охарактеризувати низкою переваг, які зумовлені принципом їх конструкції. Основний (базовий) просторовий елемент, що визначає форму, складається з системи похилих й горизонтальних стрижнів. Ці стрижні розміщені в межах базового елемента упорядковано, а їх структура нагадує структуру кристалів, що створені природою, як то як графіт чи алмаз.

Термін «кристал» походить від грецьких слів, що означають «холод» і «застигати», тобто «застиглий на холоді». Греки використовували це слово для позначення гірського кришталю. У 1669 році натураліст із Данії Нільс Стенон опублікував свою роботу «Про тверде, що природно розташовується у твердому». Спостерігаючи за різноманітними формами кварцових кристалів, дослідник виявив, що вони мають спільну характеристику — збереження значень гранних кутів. Кристали однієї й тієї ж речовини, незалежно від форми, завжди зберігають сталий кут між відповідними гранями.

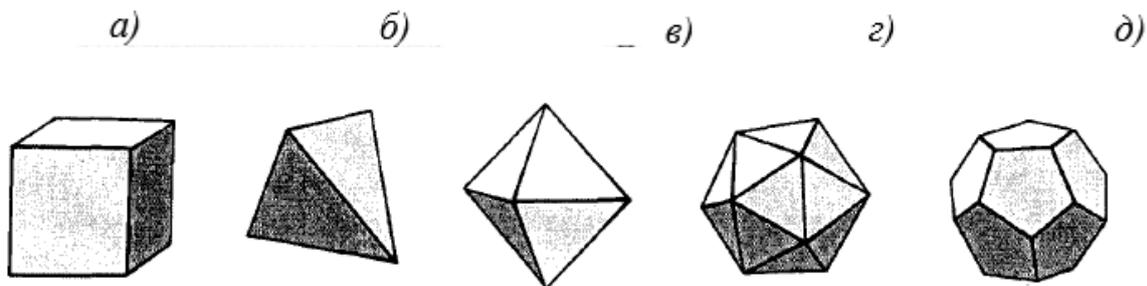


Рис. 1.1 Платонові багатогранники: тетраедр-а; куб або гексаедр-б, октаедр- в, додекаедр-г та ікосаедр-е [1]

На рис. 1.1 наведено так звані «Платонові тіла». Гранями цих тіл є плоскі правильні багатокутники. Вирізняють лише п'ять багатогранників – тетраедр, куб, октаедр, додекаедр, ікосаедр.

Будь-які із таких багатогранників (рис. 1.1) або їх комбінування у просторі можуть виконувати роль базового або, іншими словами, структуроутворюючого елемента. Для формування тіла структурної стержньової плити такий базовий (одиничний) елемент потрібно «розмножити» вздовж осей X та Y необхідну кількість разів. У якості базових елементів, найчастіше в практиці проектування, використовуються тетраедр, куб чи октаедр. Існує велика кількість можливих конструктивних рішень для структурних плит при заданих параметрах. Пошук оптимальної конструкції за певними критеріями є важливим й актуальним завданням.

Метою числового експерименту роботи є виявлення форми базового елемента при всіх інших сталих параметрах будівельної системи на напружено-деформований стан конструкцій та вресіті-решт на матеріалоємність моделей, що досліджуються.

Сформулюємо задачі дослідження задля досягнення поставленої мети.

- 1) Дослідити особливості роботи структурної сталеві плити покриття під навантаженням; виокремити чинники, що впливають на напружено-деформований стан конструкції;
- 2) прийняти тип базового (одиничного) елемента, що є формоутворюючим для плити, як фактор, від якого буде залежати напружено-деформований стан конструкції;
- 3) створення із використанням методу скінчених елементів на базі ПК ЛІРА-САПР трьох скінченоелементних схем структурної плити, які будуть відрізнятися лише за одним параметром – формою базового гратчастого формоутворюючого елемента;
- 4) задати у першому наближенні (ітерації) величини жорсткості для усіх груп конструктивних груп стержньових елементів для трьох моделей плити, що досліджуються. Ці параметри жорсткості приймаються однаковими;

- 5) виконати статичний розрахунок (1-ша ітерація), застосувавши жорсткості першого типу (прийняті спочатку) для усіх розрахункових схем плити;
- 6) на основі даних статичного аналізу в модулі «Метал» прийняти нові, запропоновані програмою жорсткості (розміри перерізу труби) усіх конструктивних груп стержнів плити;
- 7) обчислити згідно нових профілів перерізів із труб стержньових елементів схем плит вагу кожної моделі плити. Визначити модель, яка би мала найменшу матеріалоемність;
- 8) сформулювати висновки дослідження

Об'єкт дослідження – три моделі структурної стержньової просторої структурної плити розміром в плані 12,0х24,0 м, що відрізняються лише типом (формою) базового кристалічного елемента, за допомоги мультиплікації якого створюється сама плита.

Предметом дослідження є напружено-деформований стан (НДС) розрахункових схем плит, які підлягають дослідженню, їх конструктивне вирішення й матеріалоемність.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати числового дослідження дозволяють визначити із моделей структурної плити, що досліджуються, найбільш ефективну з точки зору найменшої ваги (матеріалоемності) модель.

Апробація та публікація результатів роботи.

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

Олефір Ю.М., Срібняк Н.М. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТРУКТУРНОЇ ПЛИТИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФОРМИ БАЗОВОГО ЕЛЕМЕНТУ // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (18-22 листопада 2024 р.) – Суми, 2024

РОЗДІЛ 2

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Розвиток проектування структурних конструкцій

У сучасному будівництві можна знайти багато прикладів використання структурних конструкцій у вигляді оболонки, складок або куполів. Проте, переважно, використовуються стрижневі плити. Такі конструкції виготовляються зі сталі, деревини, а іноді, навіть із пластичних мас. Такі конструкції мають ряд переваг. У дослідженні [3] детально розглядаються різноманітні типи просторових сіток чи структур. Завдячуючи гратчастій конструкції, плита здатна витримувати великі навантаження та є надзвичайно стійкою. Структурна плита — це, насамперед, просторова конструкція, що спроможна перекивати значні прольоти (≥ 100 м). Кожен елемент такої плити працює лише на стискання або розтягання, оскільки вертикальне навантаження на конструкцію передається через вузли верхнього поясу. Інші види зусиль є незначними й не впливають на конструювання елементів.

Зазвичай структурні конструкції покриття виготовляють зі сталі. Однак іноді для створення таких плит використовують ламіновану деревину, яка має високу міцність і за своїми фізико-механічними та міцнісними характеристиками не поступається сталі. У порівнянні з традиційними плоскими плитами, структурні плити будуть економічнішими за кількома параметрами.



Рис. 2.1 Структурна плита покриття типу «Кисловодськ» обперта на чотири опори

Однією з основних переваг структурних плит є їх просторова робота. Якщо постійне навантаження від покрівлі рівномірно розподіляється по площі плити або виникає локальне навантаження, то незалежно від напрямку та характеру цього навантаження, працювати починають всі стержні, тобто вся система працює в цілому. Крім того, структурні плити вирізняються підвищеною надійністю в разі раптових руйнувань.

Рекомендована товщина (висота) плити становить $(1/32)L$. Такі плити здатні перекривати прольоти до 100 м. Крім того, можна уніфікувати велику кількість стержнів й вузлів. Тобто для конструктивних груп елементів плити можна використовувати однакові стержні та вузли. Різні схеми структурних плит зображені на рис. 2.2.

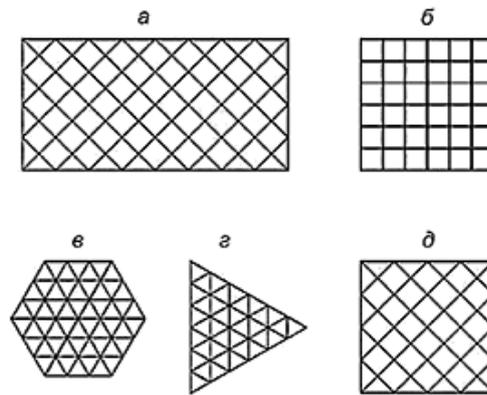


Рис.2.2 Перехресні стержньові системи перекриттів: а, б, д - з квадратними комірками; в, г - з трикутними комірками

Ці конструктиви стержньових систем рекомендується використовувати для прольотів від 18,0 м до 65,0 м. Товщина (висота) плити стержньової структури покриття повинна бути в межах від $1/30$ до $1/15$ від величини прольоту. Це значення залежить від планувального контуру, умов спирання конструкції на опори, вимог до жорсткості та деформативності структури. Розмір ячеек поясних сіток поясів має бути в діапазоні від $(1/15 \dots 1/7)$ з урахуванням типу настилу як елемента покриття покриття, щоб уникнути використання прогонів. Як рекомендації щодо улаштування можна виділити такі:

- структурні плити повинні спиратися на колони, що розташовано по периметру, із кроком від 6 до 12 м, без встановлення торцевих ферм;
- передбачати консольні розвантажувальні зв'язи, довжина яких має становити не більше 0,25 від розміру прольоту (рис. 2.2, а) або не перевищувати п'ятикратної висоти (товщини) плити.
- влаштовувати додаткові опори усередині покриття, утворюючи багатопрогонову безперервну систему, з використанням колон із розвиненими капітелями або просторових опор.

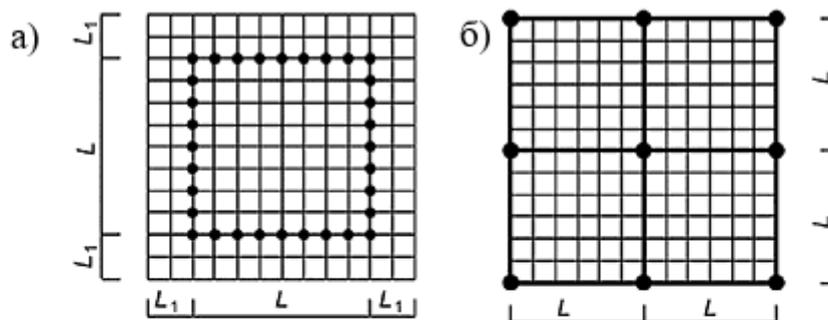


Рис. 2.3 Варіанти спирання перехресних систем покриття: великопрогонові будівлі з консольними звисами - а; багатопрогонові будівлі з сіткою колон 18x18 м або 24x24 м, з опиранням на колони по кутах кожного модуля-б

Іншою суттєвою перевагою є можливість транспортування конструкції в розібраному вигляді (у формі уніфікованих елементів) до важкодоступних будівельних майданчиків, а також виконання монтажу на землі з подальшим встановленням у проектне положення. Конструкцію можна демонтувати, повторно зібрати та використовувати повторно.

Структурами зазвичай вважають системи стержнів, які сходяться у вузлах й розташовані в просторі за чітким геометричним порядком. Структурні плити формуються із двох паралельних поясних сіток, розміщених на певній висоті одна від одної. Між верхнім і нижнім поясами розташовують стійки та розкоси, які утворюють елементи решітки. Конструкція загалом складається зі стрижневих пірамід із квадратною чи трикутною основою. Ці піраміди (базові елементи) мультиплікуються відносно осей у плані.

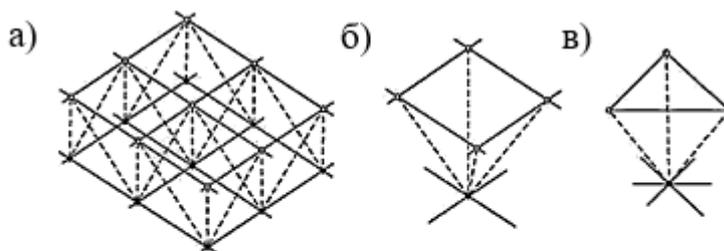


Рис. 2.4 Структурна плита: а - загальний вигляд; б, в - ячейка, що повторюється, з квадратною або трикутною основою

Найбільш характерні та найпопулярніші стержневі структурні системи наведено на рис. 2.5.

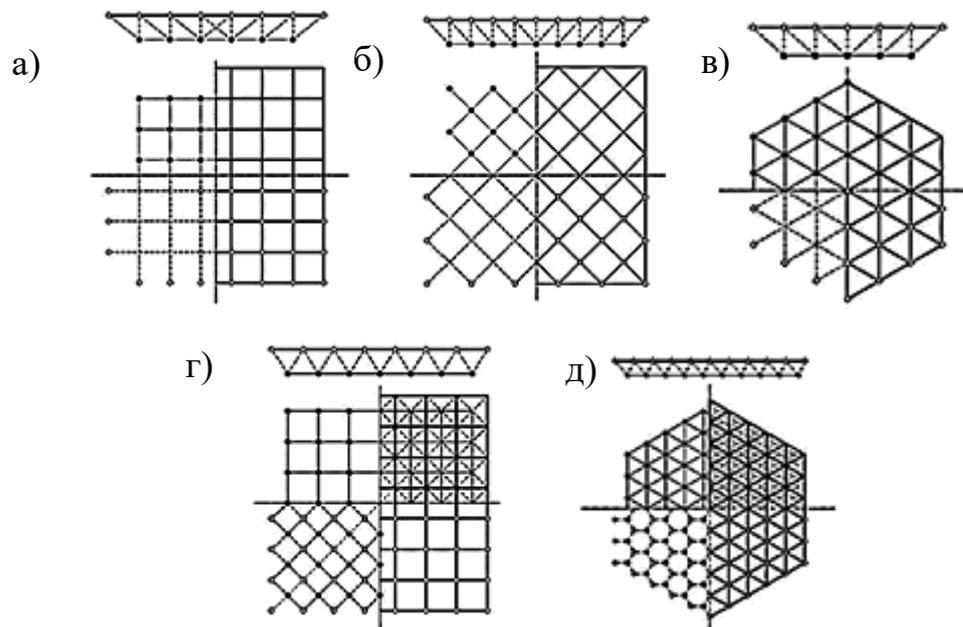


Рис. 2.5 Схеми стрижневих структурних плит: поясна сітка з ортогональними ячейками - а; поясна сітка з ортогональними ячейками - б; поясна сітка з трикутними ячейками - в; сітка з поясами, зрушеними на половину ячейки - г; змішана сітка, в якій одна складається з шестикутників, а інша – з трикутників - д

Верхня та нижня поясні гратчасті сітки є ортогональною плоскою системою стержнів. Розкоси утворюють систему просторових похилих стержнів. Іншим можливим варіантом форми поясних сіток у плані є шестикутні структури (рис. 2.5, в). Стержні для сталевих структур зазвичай виготовляють із труб або відкритих профілів, таких як кутники, швелери або інші профілі. Матеріалами для цих елементів слугують сталь, алюміній або їх сплави. Конструкції з'єднуються за допомогою різноманітних вузлів різних типів. Існуючі вузлові рішення структурних конструкцій, залежно від типів з'єднань, що в них використовуються, поділяються на три основні групи (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1- Класифікація вузлових сполучень конструкцій просторових структур

| № групи | Назва та характеристика групи |
|---------|---|
| 1. | <i>Зварювальні вузлові з'єднання, виготовлені на будівельному майданчику;</i> |
| 2. | <i>Болтові вузлові з'єднання. До них відносяться вузлові з'єднання структурних конструкцій, що виключають зварювання як в заводських, так і монтажних умовах і дозволяють збирати структури зі стрижнів на болтах або інших збірних пристосуваннях</i> |
| 3. | <i>Комбіновані вузлові з'єднання. До них відносяться з'єднання, в яких зварювання виконується в заводських умовах, а збірка вузла - в будівельних умовах на болтах. Характерним для цієї групи є розчленовування вузлового з'єднання на дві групи деталей. Перша приварюється в заводських умовах до кінців з'єднувальних стрижнів (болтові наконечники, клини, листові косинки і т. д.), а інша – у вигляді шайб, болтів і конекторів об'єднує кінці стрижнів в вузол.</i> |

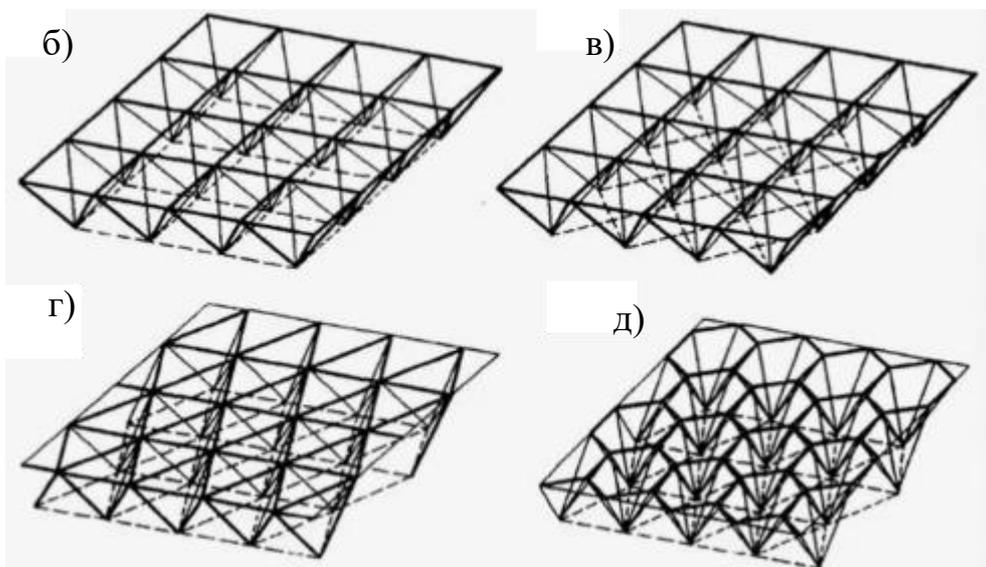
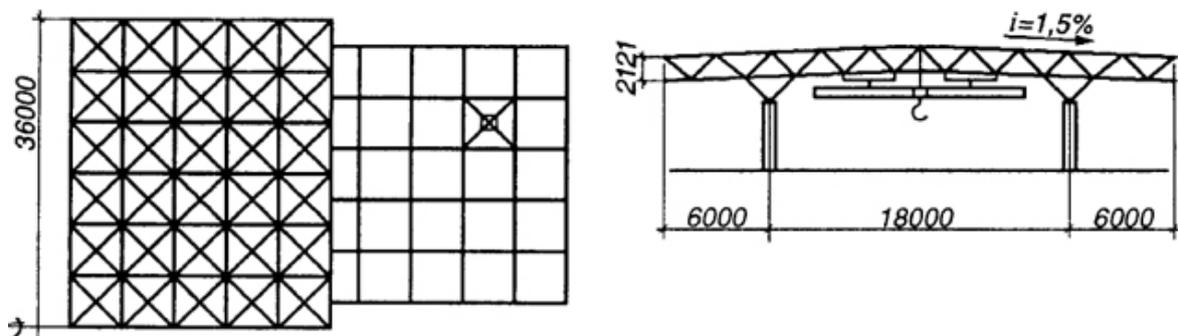
В конструюванні просторових стержньових плит традиційно застосовується система типу «MERO» [2]. Ця система збирається із трубчастих стержньових профілів та вузлових елементів, які виконано як сталеві кулі з глухими отворами. До цих отворів угвинчуються болти нестандартної конструкції (рис. 2.6).

Під час експлуатації вузлові елементи зазнають значних осьових зусиль розтягування та стискання. Від вигинаючих моментів, що виникають в вузлах, при прогині конструкції, яка змонтована, є небезпека руйнування в місці вільної частини різьблення болтів [2].



Рис.2.6 Вузол з'єднання системи «MERO»

Розрізняють конструкції з регулярною та нерегулярною будовою, що характеризується отвором (рис. 2.7, а-д). Ці системи називають «розрідженими». Такі системи мають меншу жорсткість у порівнянні з конструкціями, що характеризуються регулярною структурою.



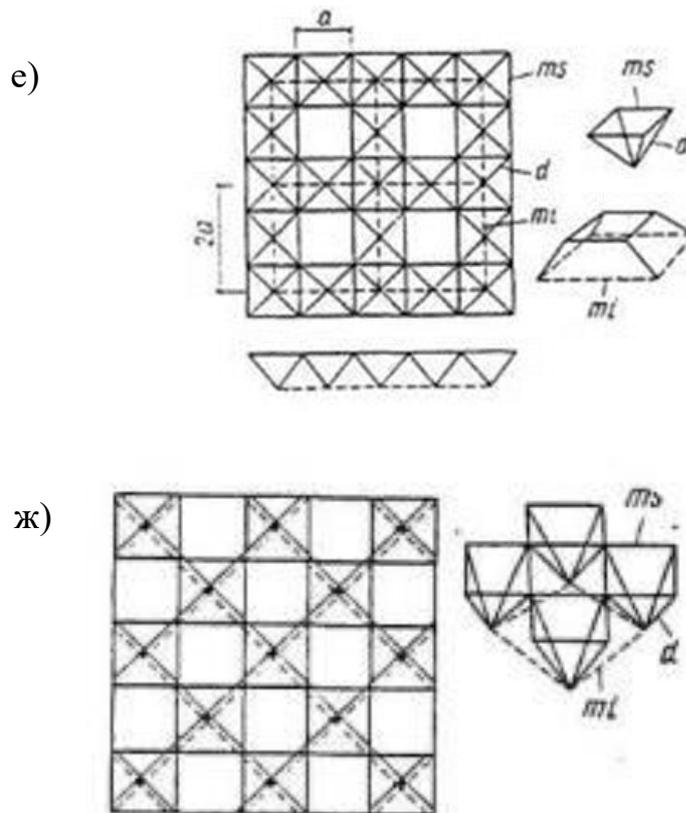


Рис. 2.7 Системи структурних плит з регулярною будовою (з решітчастих пірамід): система з квадратною основою поясів-а; з квадратною основою (пентаедрів чи «напівоктаедрів») -а, б, в; з трикутною основою (тетраедрів)-г; з шестикутною основою (гептаедрів) -д; з розрідженою нижньою поясною сіткою та частково розрідженою розкісною решіткою-е; ортогональні сітки поясів розгорнуті на 45° щодо один одного; розріджені розкісні грати -ж

Плити, що мають регулярну структуру, є ефективними для перекриття прольотів із співвідношенням боків 1:1,5. При більшому співвідношенні сторін конструкція плити працює як балка за напрямком прольоту, який є найменшим. Таким чином, найраціональнішою можна вважати квадратну конфігурацію плити у плані. Чим частіше розташовані колони (опори) по контуру, тим більш ефективною є конструкція. Варіанти спирання стержньової плити на опори приведено на рис. 2.8.

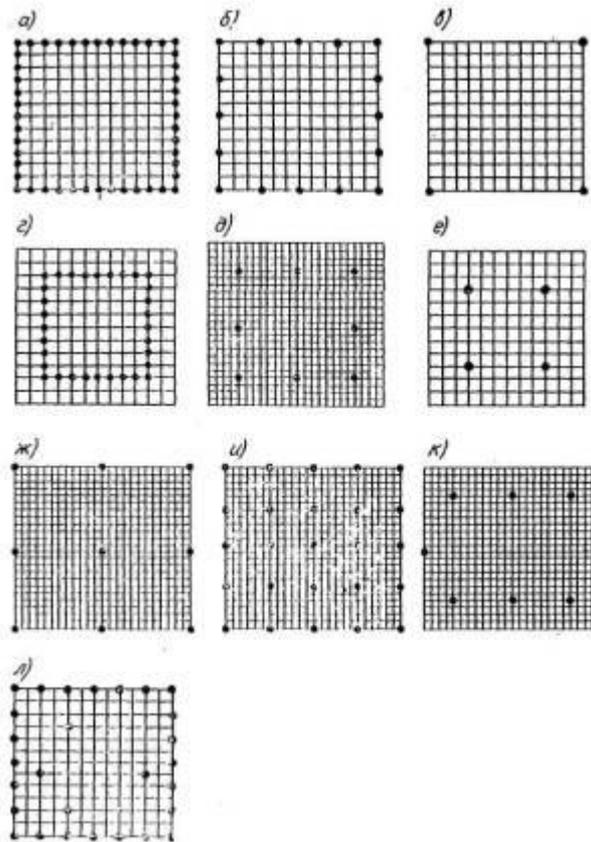


Рис. 2.8 Деякі можливі способи спирання плити на стійки;
 контурні- а, б, в внутрішньоконтурні -г, д, е; змішані -ж, і, к;
 довільні -л

2.2 Методи регуляції зусиль в стержнях структурної плити

Серед методів регуляції зусиль, що ж можливими, в стержнях структурної решітчастої плити слід виокремити такі:

- метод регулювання зусиль із застосуванням затяжок по нижньому поясу;

- умови спирання конструкції плити (або так звані граничні умови). В тому числі впливає спосіб розстановки колон та кількість. (рис. 2.8)
- установлення стрижнів, що мають відхилення від попередньо заданих геометричних параметрів. Зусилля тут можуть регулюватися шляхом попереднього виготовлення окремих стрижнів із відхиленням від проектних геометричних розмірів. (рис.2.10).

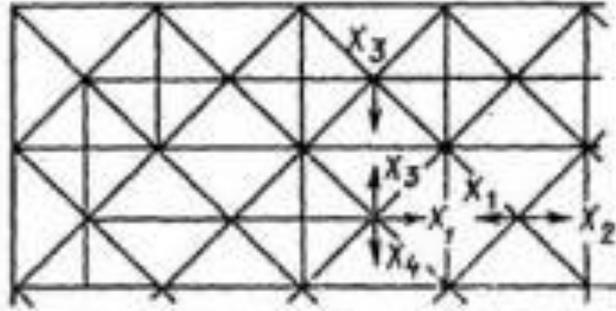


Рис. 2.10 Основна система під час регулюванні осьових зусиль способом улаштування деяких стержнів із відхиленням від первісних геометричних розмірів

- *спосіб осідання опор.* В плитах, що мають в плані прямокутну чи квадратну конфігурацію та мають ортогональне розташування стержнів у поясах, що шарнірно обперті на кілька колон по кожній стороні контуру, виникає відчутна різниця внутрішніх сил у поясах. Це обумовлює збільшення витрат сталі. Одержати зусилля в поясах системах, які змінюються незначно, є важливою задачею, що вирішується завдяки примусовому вирівнюванню кривин уздовж осей. Це вирівнювання можна отримати завдяки осіданню опор (рис. 2.11).

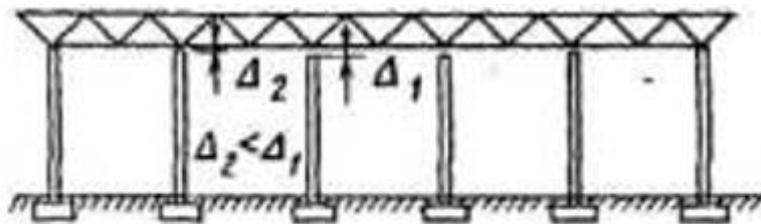


Рис.2.11 Вирівнювання зусиль в поясах сітках структурної плити шляхом осідання опор

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи, які застосовано в дослідженні, є наступними:

- 1) *метод збирання й аналізу даних та інформації* – оцінка інформації щодо стрижневих схем структур, їх сполучення; аналіз рекомендацій щодо вибору оптимальних параметрів розрахунку, аналіз методів регулювання зусиль в стрижнях плитної конструкції.
- 2) Застосування *методу скінчених елементів*, який є математичним підходом для створення розрахункових моделей, зокрема будівельних конструкцій у програмному комплексі ЛІРА-САПР. Цей метод використовується для визначення напружено-деформованого стану плитних структур, прийнятих до розрахунку.
- 3) використання методу *проектування сталевих елементів* у модулі «Метал» ПК ЛІРА-САПР відповідно до норм [5], з оцінкою відсоткового використання площі перерізу стрижнів згідно з першою та другою граничними станами (1ГС та 2ГМ) за нормами [5].
- 4) *аналітична обробка даних* розрахунків за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНИХ СХЕМ В РАМКАХ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

4.1 Алгоритм проведення числового експерименту в ПК ЛІРА-САПР

На рис.4.1 наведено алгоритм виконання числового експерименту.

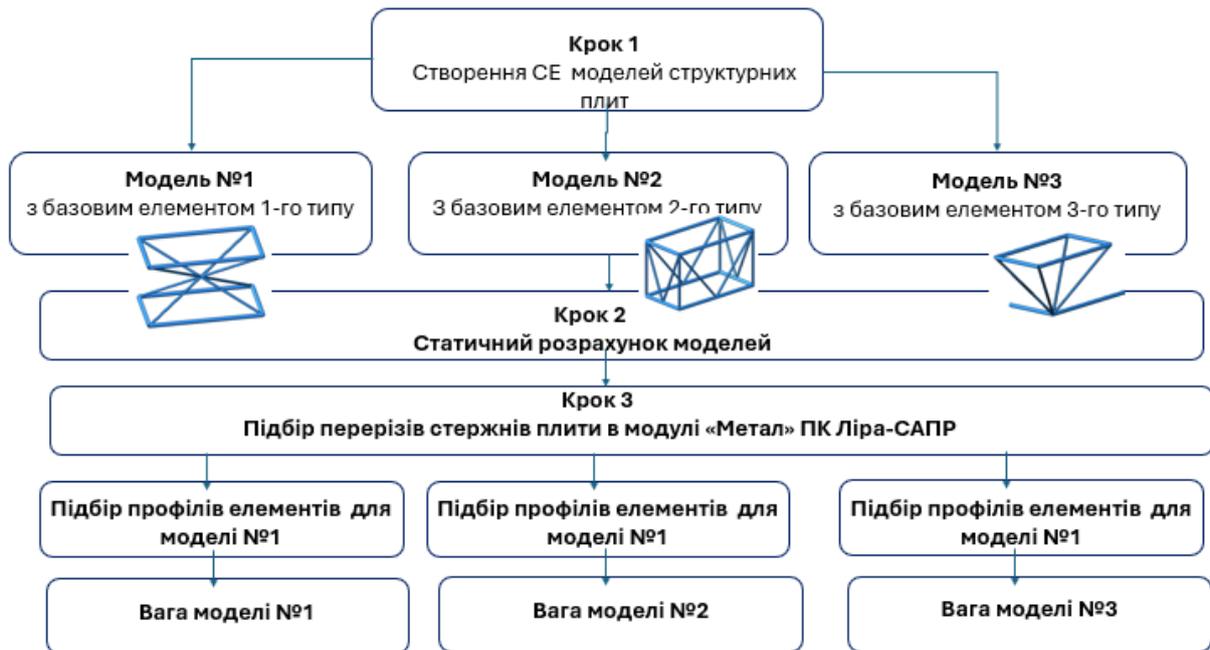


Рис. 4.1 Алгоритм виконання числового експерименту в рамках дослідження

В рамках виконання числового дослідження заплановано виконати наступні етапи:

- За допомогою програмного комплексу Ліра-САПР створено три моделі структурної плити покриття. Розміри конструкції в плані становлять 24,0 x 12,0 м. Моделі спираються по нижньому поясу на колони в чотирьох кутах прямокутної в плані конструкції. Відмінність структурних плит є лише в тому, що в основі формоутворення кожної моделі лежить базовий структурний елемент, мультиплікація якого в горизонтальній площині по осях X та Y й утворює структуру плити.

- У розрахункових схемах виокремлено чотири групи конструктивних елементів: група стержнів верхнього поясу, група стержнів нижнього поясу, група елементів решітки та група конструктивних елементів «колони».
- На першому етапі розрахунку конструктивним групам елементів призначено перетини профілю із труб (табл. 4.1); На 1-му етапі розрахунку для конструктивних груп елементів були обрані перетини профілю з труб (таблиця 4.1).
- Виконано статичний розрахунок для трьох моделей структурних плит.
- Згідно результатів статичного розрахунку та за допомогою постпроцесора «Метал» ПК Ліра-САПР із урахуванням умов міцності й деформативності (1 ГС і 2 ГС), автоматизовано підібрані нові параметри перерізів із труб для всіх конструктивних груп стержнів конструкції. Оцінено відсоток використання підібраних нових перерізів елементів плити за 1ГС та 2ГС;
- Визначається вага кожної з трьох схем плит покриття згідно результатів конструювання після першого ітераційного розрахунку.
- Обирається модель плити з найменшою вагою з-поміж трьох її варіантів, що відрізняються лише типом формоутворюючого елемента.

4.2 Скінченоелементна модель плити структурного типу

Як конструкції, що підлягають дослідженню, розглянуто три плити у вигляді просторової стрижньової конструкції (рис.4.2, а, в, г). Плита запроектована плоскою, із паралельними горизонтальними верхнім та нижнім поясами. Розмір плити в плані становить **24,0x12,0 м.** Висота плити є постійною та складає 1,8 м. Габарити формоутворюючого елемента становлять **3,0x1,2x1,8 м.**

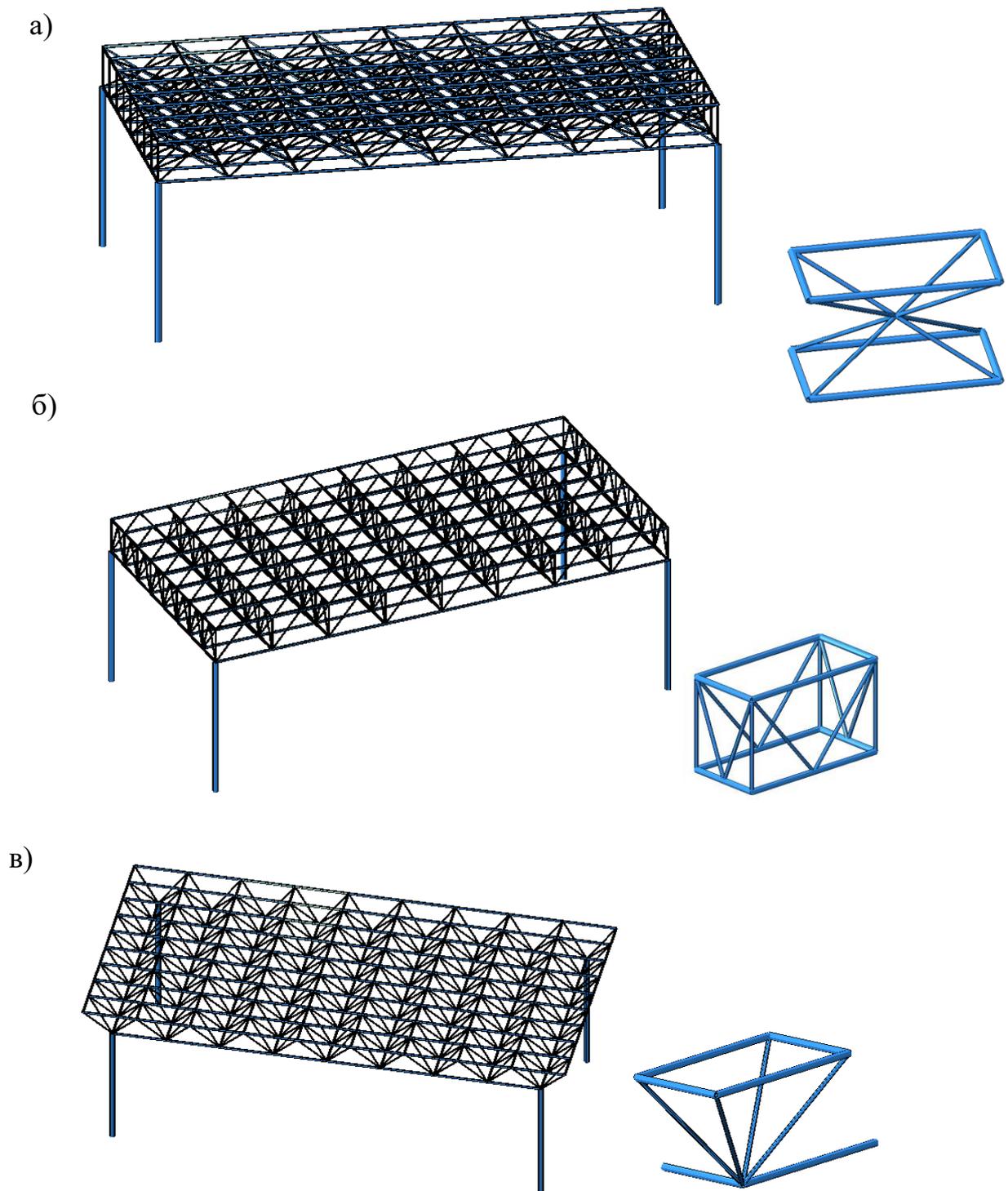
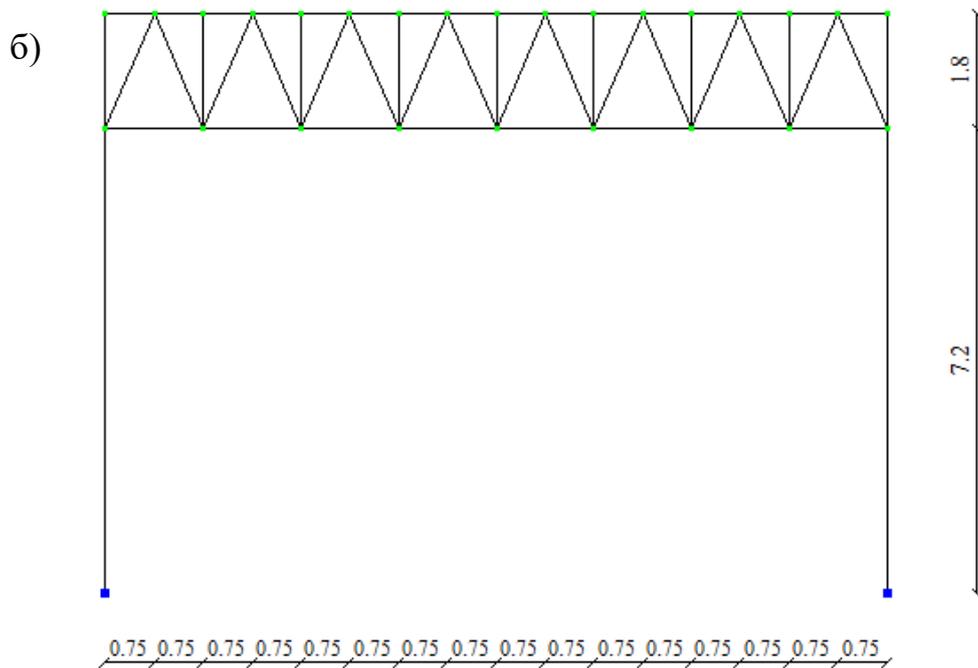
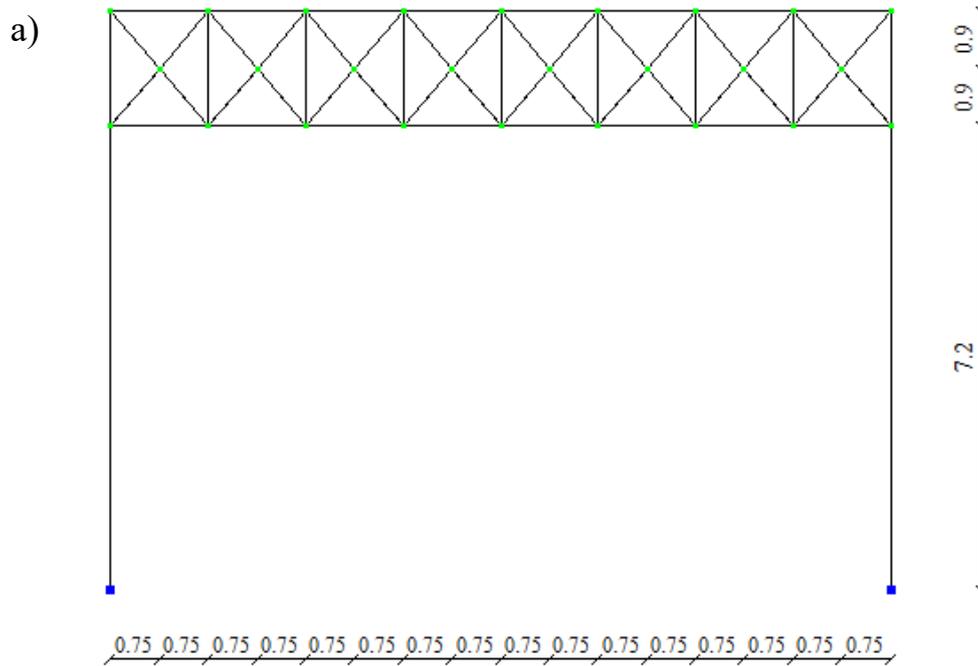


Рис. 4.2. Моделі сталевї плити покриття, яка досліджується: модель 1 з базовим формоутворюючим елементом 1-го типу-а; модель 2 з базовим формоутворюючим елементом 2-го типу -б; модель 3 з базовим формоутворюючим елементом 1-го типу-в

На рис.4.3 наведено вид в площині в площині YOZ для моделей, що досліджуються.



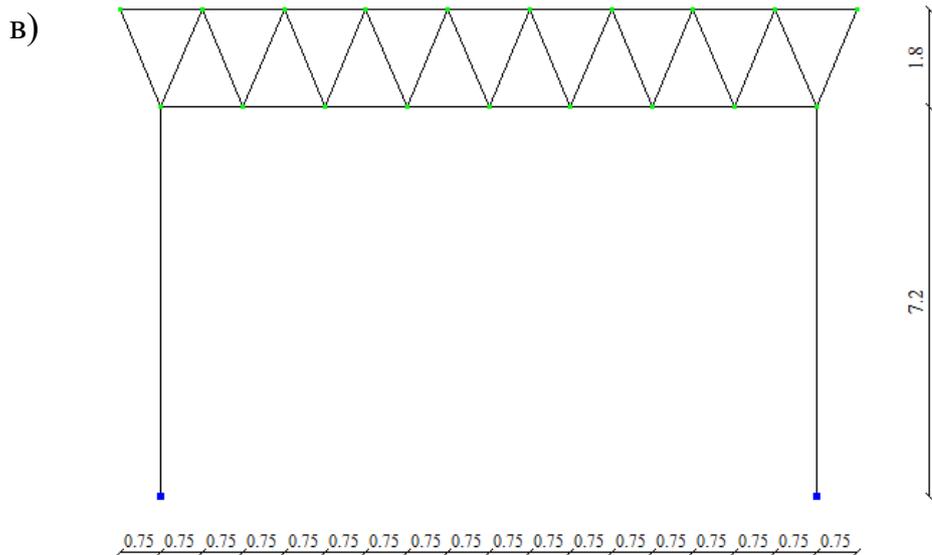


Рис. 4.3 Вид моделей в ПК Ліра-САПР в площині YOZ: схема №1-а; схема №1-б; схема №3-в

4.3 Вплив форми одиничного (базового елемента) на напружено-деформованого стану стержнів структурної плити

На напружено-деформований стан структурних злегшених плит впливає багато факторів, як то:

- спосіб розташування колон, їх кількість, інші граничні умови конструкції (спирання на стіни);
- влаштування затяжок, що отримали попереднє напруження по нижньому поясу плити;
- форма одиничного (базового) елемента структури, що формоутворює всю конструкцію плити;
- варіювання висотою (товщиною) плити обумовлює зміну (перерозподіл) зусиль в стержнях конструкції

Отже, при всій незмінній сукупності параметрів (розміри плити, поперечний переріз стержнів, марка сталі, спосіб з'єднання елементів між собою) варіацією (зміною) лише одного з факторів, що зазначені вище, можна досягти суттєвої різниці у значенні напружено-деформованого стану конструкції.

Структурні плити є ефективними сучасними конструкціями покриття, що дозволяють перекривати значні прольоти без проміжних опор, тому багатовекторне дослідження роботи таких конструкцій під навантаженням є задачею актуальною.

Так, розглядаючи три моделі плити покриття з легких трубчастих стержнів, що мають розміри в плані 12x24 м й однакові граничні умови, але такі, що відрізняються лише базовим елементом, що їх формоутворює, можна оцінити напружено-деформований стан кожної моделі та визначити її вагу згідно методики конструювання за нормами [5].

4.4 Граничні умови, які призначено для схем плити. Призначення параметрів жорсткості стержнів

Всі моделі структурної плити спираються на чотири колони в кутах. Спирання відбувається на колони по нижньому поясу конструкції. (див. рис. 4.2).

Всі стержні між собою з'єднано рухомо (шарнірно). Перетин для стержнів всіх груп запроектовано із труби безшовної гарячекатаної згідно [6]. Усі елементи плити відповідно до конструктивної ознаки згруповано за такими типами:

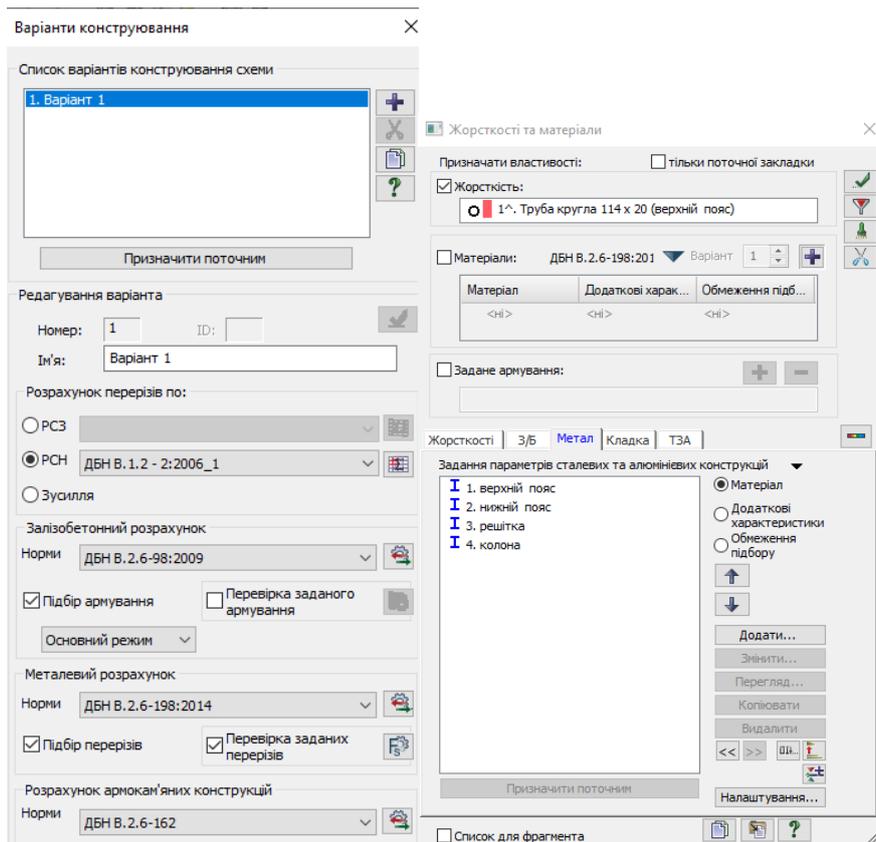
- стержні верхнього поясу;
- стержні нижнього поясу;
- стержні решітки

Попередньо, за першої ітерації, прийнято характеристики жорсткості для конструктивних груп стержнів. Всі елементи конструкції прийнято із сталі С235. Характеристики жорсткості наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Характеристики жорсткостей конструктивних елементів структурного покриття (при ітераційному розрахунку №1)

| Назва елемента | Поперечний переріз, см | E, т/м ² | R, т/м ³ | μ | Сталь С235 | q, т/м |
|---------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|-----|------------|---------|
| 1.Стержні верхнього поясу | Труба ТБ 114х20 (ДСТУ 8938:2019) | 2,1·10 ⁷ | 7,85 | 0,3 | С235 | 0,04634 |
| 2.Стержні нижнього поясу | Труба ТБ 114х20 (ДСТУ 8938:2019) | 2,1·10 ⁷ | 7,85 | 0,3 | С235 | 0,04634 |
| 3.Елементи решітки | Труба ТБ 68 х 6 (ДСТУ 8938:2019) | 2,1·10 ⁷ | 7,85 | 0,3 | С235 | 0,0092 |
| 4. Колони | Труба ТБ 273 х 40 (ДСТУ 8938:2019) | 2,1·10 ⁷ | 7,85 | 0,3 | С235 | 0.2298 |

З метою автоматизованого підбору перетинів в постпроцесорі «Метал» стержням плити призначили параметри конструювання – тобто метод підбору перерізів елементів згідно методики розрахункового сполучення навантажень та згідно умов норм проектування [9].



а)

б)

Рис.4.4 Вікно варіантів конструювання-а; вікно призначення параметрів металевих конструкцій -б

При призначенні матеріалів для прийнятих конструктивних груп елементів було застосовано типологічно для стрижнів верхнього й нижнього поясів – «елемент поясу ферми», а для елементів решітки типологічно було прийнято «елемент решітки ферми».

Розрахунок конструкцій із сталі відбувався у її пружній стадії роботи.

4.5 Навантаження, що прийнято

Основними навантаженнями, що прийнято на плиту, є власна вага самої сталевої плити, власна вага усіх шарів покрівлі й навантаження від снігу. Як вказують дослідження [9] навантаженням від вітру можна знехтувати, так як зусилля від дії вітру дорівнюють приблизно 1%. Тому вплив цих зусиль на напружено-деформований стан всієї конструкції не є суттєвим.

Будівля, яка проектується, будується в місті Суми, то характеристична величина снігового навантаження згідно норм [9] становить $0,167 \text{ т/м}^2$.

Прийнято три види завантаження:

- *Завантаження № 1.* Тип - постійне, власна вага плити, що задавалася автоматично ПК Ліра-САПР й зазнавала змін на кожній ітерації підбору перетинів груп конструктивних елементів
- *Завантаження № 2.* Тип - постійне та являє собою власну вага конструктивних шарів покрівлі (навантаження від покриття (від профнастилу: $0,0914 \text{ кН/м}^2$ та від прогонів: $0,0903 \text{ кН/м}$),
- *Завантаження № 3.* Тип – тимчасове, сніг: $S_0=1,67 \text{ кН/м}^2$ – див.

рис.4.5.

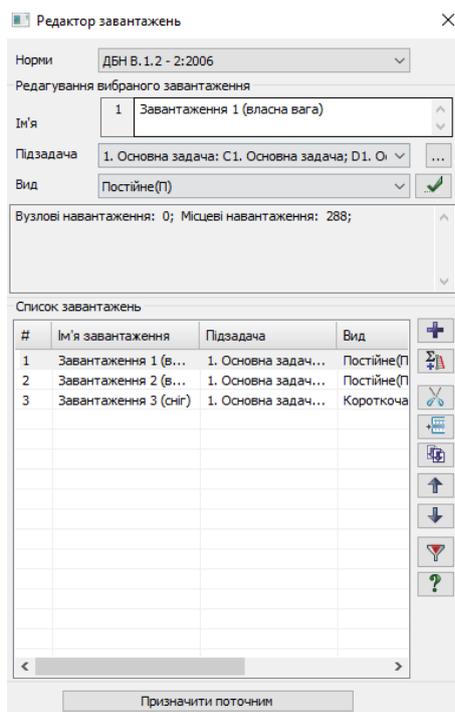


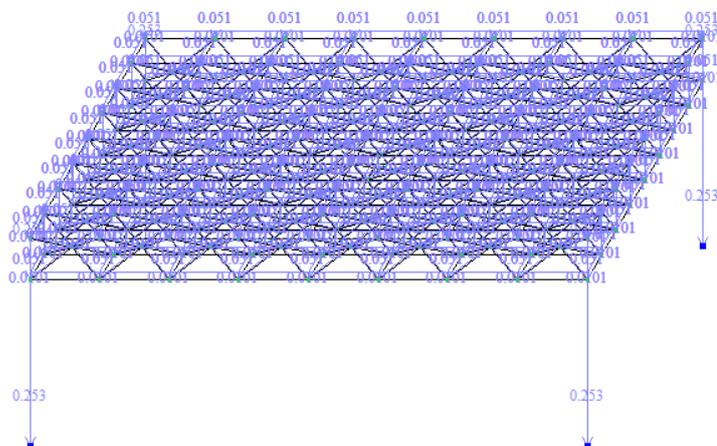
Рис. 4.5 Вікно призначення навантажень на структурну плиту

Навантаженні від рівномірно розподіленого по площі в Завантаженнях №2 та №3 приведено до вузлового згідно вантажній площі. Навантаження в розрахунковій схемі прийнято таким, що прикладено у вузлах верхнього поясу структурної плити (завантаження №2 та завантаження 3) – рис. 4.6.

На рис. 4.6 наведено всі види завантажень вузлів верхнього поясу завантаження згідно прийнятих типів навантажень.

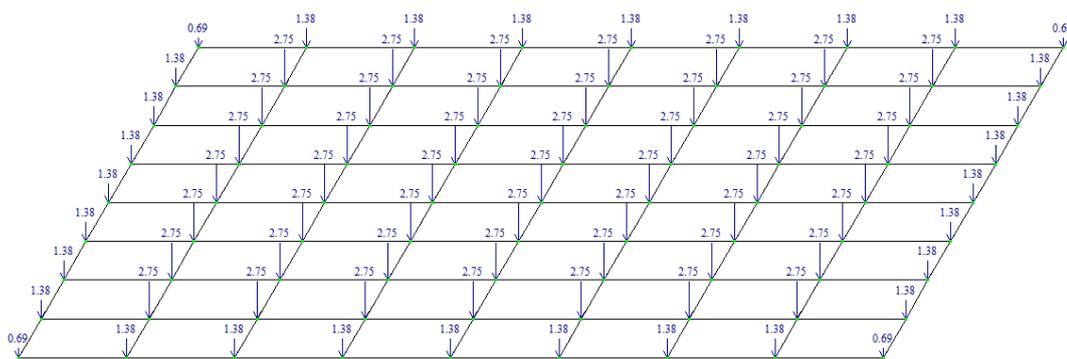
1.Завантаження 1 (власна вага)

а)



2.Завантаження 2 (покрівля)

б)



3.Завантаження 3 (сніг)

в)

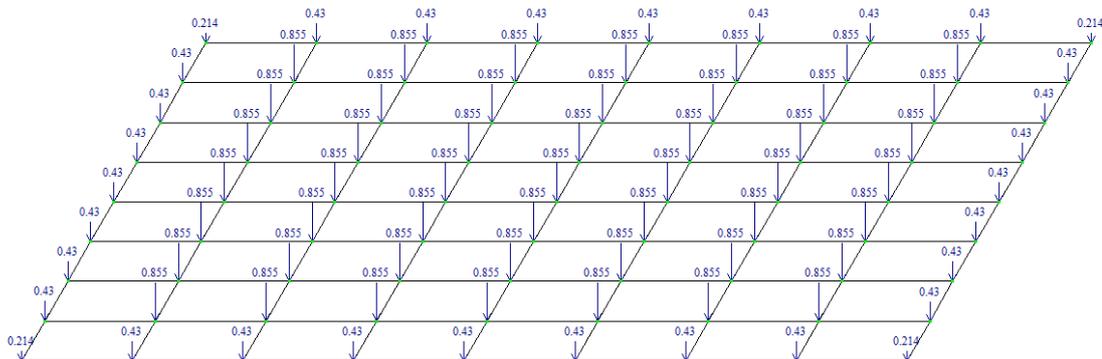


Рис. 4.6 Завантаження, що діє на плиту: власна вага конструкції -а; вага конструкції покрівлі -б; снігове навантаження - в

РОЗДІЛ 5

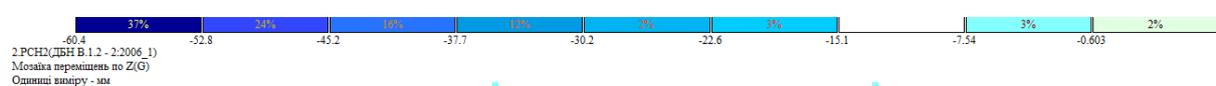
АНАЛІЗ ДАНИХ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ

Порівняння результатів розрахунку, що було здійснено в модулі ЛПР-Візор дозволяє визначити більш раціональну модель з-поміж трьох, що досліджують, за критерієм величини осьових зусиль N та величиною максимальних вертикальних деформацій структури f_z .

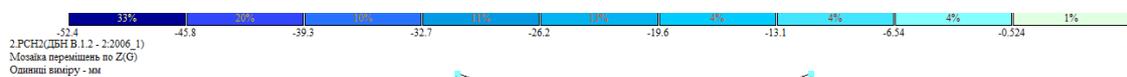
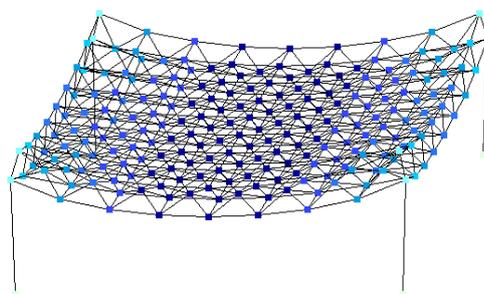
5.1 Деформативність розрахункових моделей

При показниках жорсткостей перерізів трубчатих елементів, що прийняті при першій ітерації (табл. 5.1), розрахуємо три розрахункові моделі. Оцінка параметрів напружено-деформованого стану схем виконується за розрахунковим сполученням навантажень, а саме від найбільш несприятливої комбінації їх.

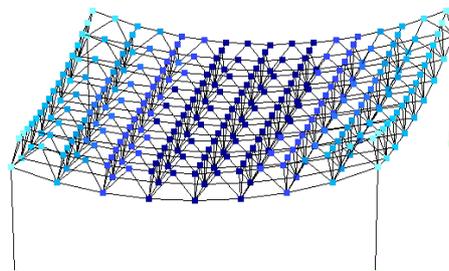
На рис. 5.1 приведено мозаїку переміщень вузлів вздовж осі Z від РСН2 для схем, що досліджуються.



а)



б)



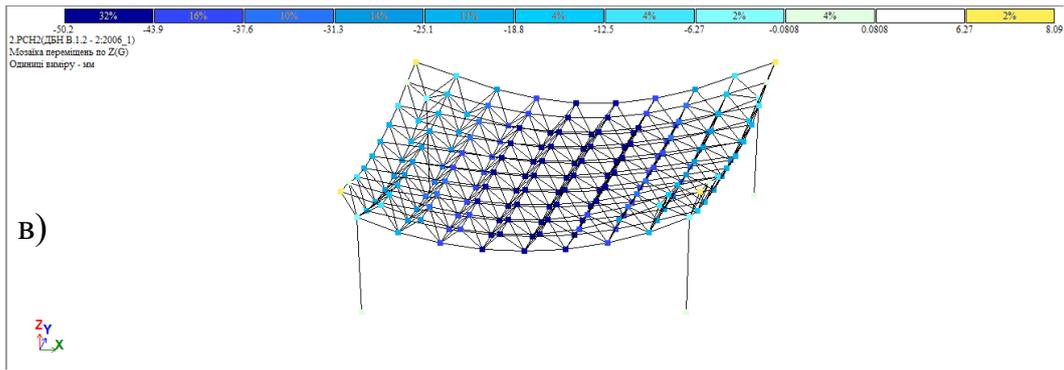


Рис. 5.1 Мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема: для схеми №1-а; для схеми №2-б; для схеми №3-в

В таблиці 6.1 наведено максимальні переміщення f_z вузлів скінченоелементної схеми.

Таблиця 5.1 Максимальні переміщення f_z вузлів скінченоелементної схеми від РСН 2

| № сполучення | Схема №1 | Схема №2 | Схема №3 |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| РСН 1 | 48,3 | 41,7 | 39,9 |
| РСН2 | 60,4 | 52,4 | 50,2 |
| РСН3 | 59,2 | 51,3 | 49,2 |

На рис. 5.2 зображено максимальні переміщення вузлів f_z в скінченоелементних моделях структурних плит від РСН2.

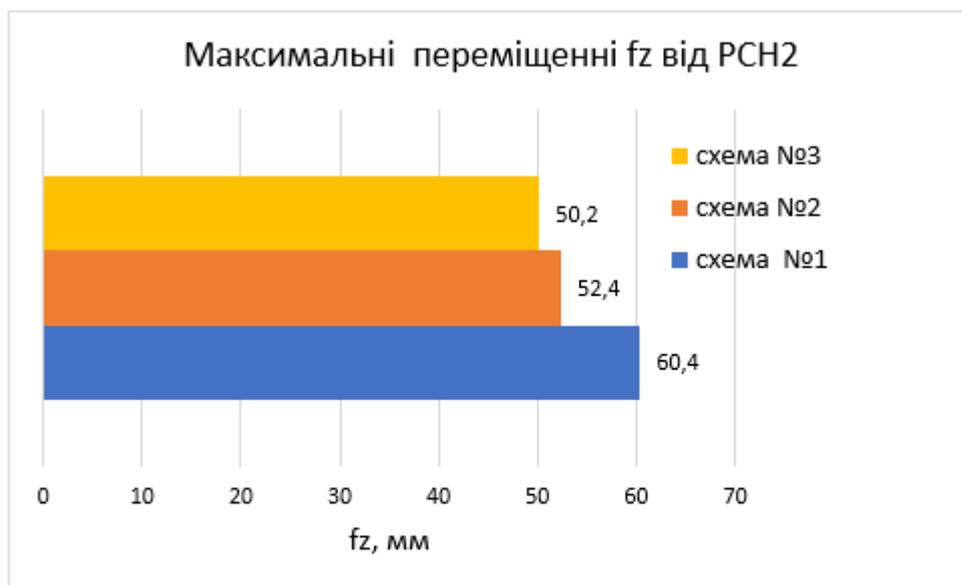


Рис. 5.2 Максимальні переміщення вузлів f_z в скінченоелементних моделях структурних плит від РСН2

Очевидно, що максимальний вертикальний прогин є найменшим для моделі №3. Всі максимальні прогини для всіх моделей знаходяться в допустимих межах.

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

5.2 Напружений стан моделей, що досліджуються

На рис.5.3 наведено мозаїку осьових зусиль N в стержньових елементах конструкції від РСН 2. Так, верхній пояс структурної плити працює на стиск, нижній – на розтяг, а стержні решітки мають знакозмінне значення.

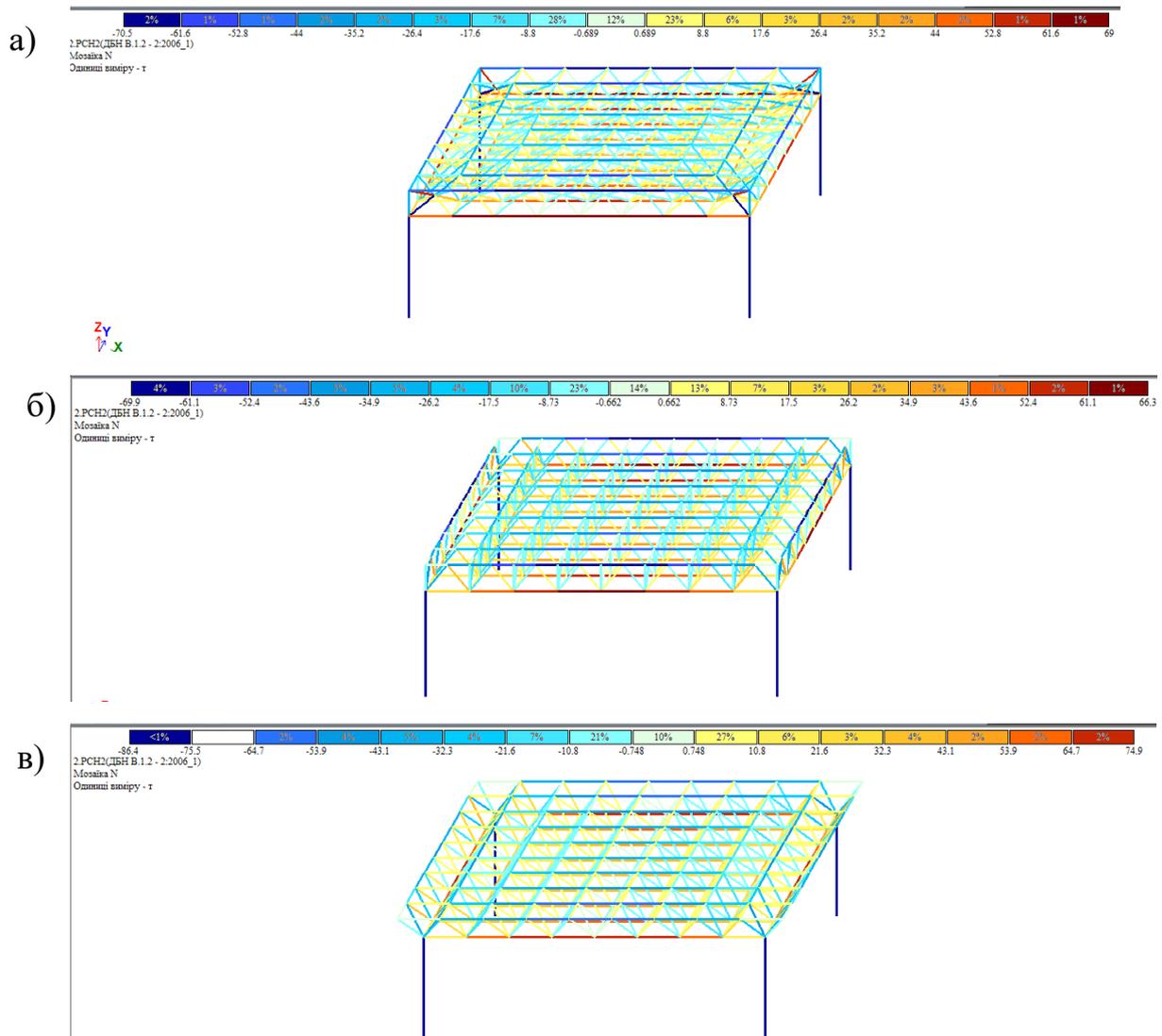


Рис. 5.3 Мозаїка зусиль N у стержнях від РСН2: для моделі №1-а; для моделі №2-б; для моделі №3-в

На рис. 5.4-5.6 наведено епюри зусиль N в окремих конструктивних групах стержнів.

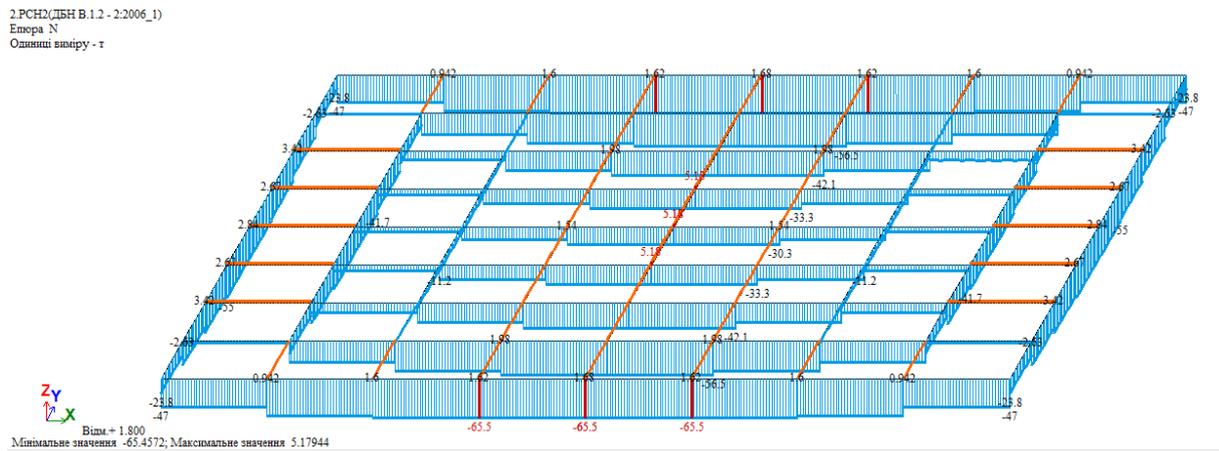


Рис. 5.4 Епюри зусилля N в стержнях верхнього поясу в структурній плиті за моделлю №1

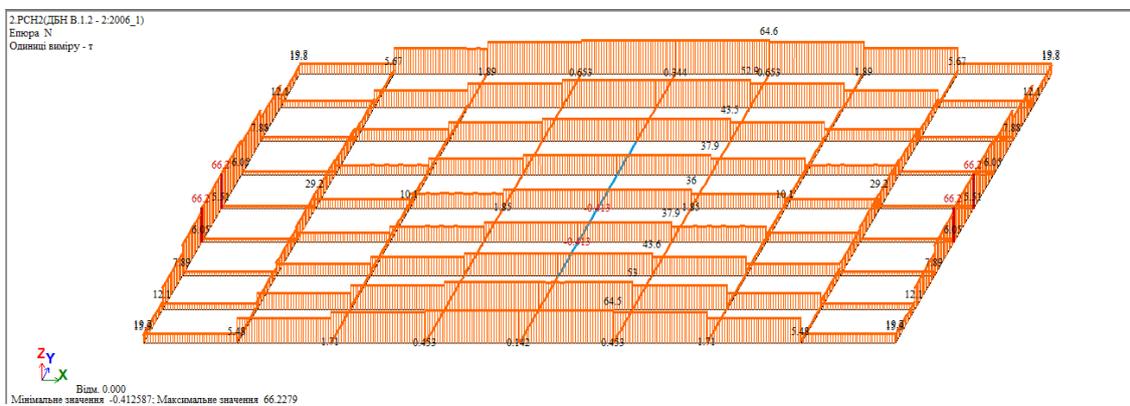


Рис. 5.5 Епюри зусилля N в стержнях нижнього поясу в структурній плиті за моделлю №2

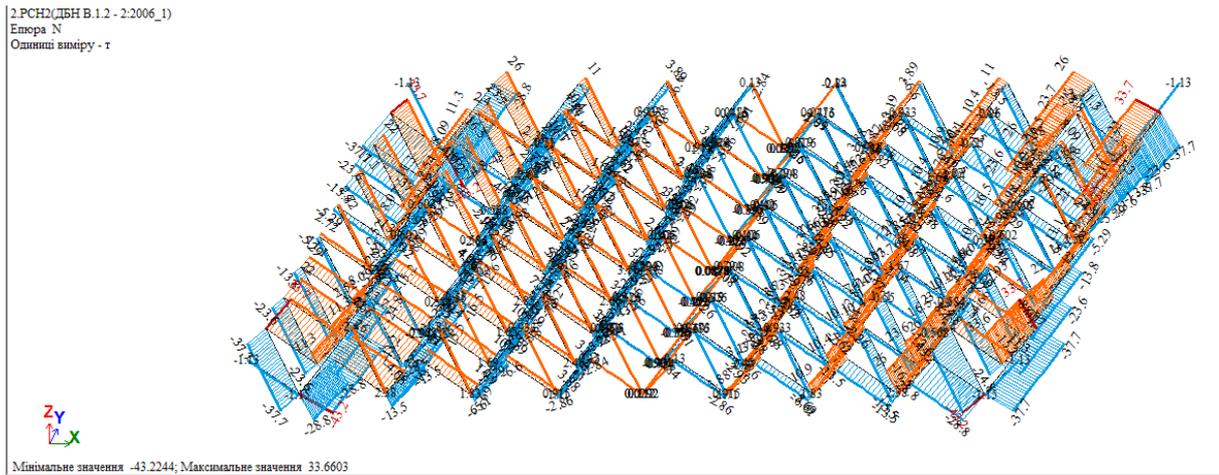


Рис. 5.6 Епюри зусилля N в стержнях решітки в структурній плиті за моделлю №3

В таблицях 5.2-5.7 наведено максимальні значення осьових сил N від РСН2 для усіх конструктивних груп стержнів.

Таблиця 5.2. Максимальні зусилля N (т) в стержнях верхнього поясу

| № РСН | Схема№1 | | Схема№2 | | Схема№3 | |
|-------|---------|-------|---------|--------|---------|-------|
| | РСН 1 | -52,4 | 4,15 | -42,14 | 0,52 | -48,1 |
| РСН 2 | -65,5 | 5,18 | -55,96 | 0,6 | -60,5 | 2,83 |
| РСН 3 | -64,2 | 5,08 | -54,6 | 0,6 | -59,3 | 2,77 |

Таблиця 5.3. Максимальні зусилля N (т) в стержнях нижнього поясу

| № РСН | Схема№1 | | Схема№2 | | Схема№3 | |
|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | РСН 1 | -2,97 | 55,04 | -0,37 | 41,03 | -1,67 |
| РСН 2 | -3,62 | 68,9 | -0,39 | 54,5 | -2,08 | 79,4 |
| РСН 3 | -3,6 | 67,5 | -0,38 | 53,12 | -2,04 | 73,3 |

Таблиця 5.4. Максимальні зусилля N (т) в стержнях решітки

| № РСН | Схема№1 | | Схема№2 | | Схема№3 | |
|-------|---------|-------|---------|--------|---------|-------|
| | РСН 1 | -52,9 | 48,16 | -26,16 | 25,6 | -34,3 |
| РСН 2 | -66,2 | 60,15 | -34,7 | 33,92 | -43,3 | 33,7 |
| РСН 3 | -64,86 | 58,96 | -33,85 | 33,08 | -42,4 | 33 |

Таблиця 5.5. Максимальні зусилля N (т) в колонах

| № РСН | Схема№1 | Схема№2 | Схема№3 |
|-------|---------|---------|---------|
| РСН 1 | -56,2 | -44,2 | -68,9 |
| РСН 2 | -69,9 | -58 | -86,3 |
| РСН 3 | -68,5 | -56,6 | -84,5 |

Таблиця 5.6. Максимальні моменту вигину M_y (т·м) в колонах

| № РСН | Схема№1 | | Схема№2 | | Схема№3 | |
|-------|---------|------|---------|------|---------|------|
| РСН 1 | -2,54 | 2,08 | -1,24 | 1,24 | -1,56 | 1,56 |
| РСН 2 | -2,6 | 2,6 | -1,63 | 1,63 | -1,96 | 1,96 |
| РСН 3 | -2,08 | 2,54 | -1,6 | 1,6 | -1,92 | 1,92 |

Таблиця 5.7. Максимальні моменту вигину M_z (т·м) в колонах

| № РСН | Схема№1 | | Схема№2 | | Схема№3 | |
|-------|---------|------|---------|------|---------|------|
| РСН 1 | -3,79 | 3,79 | -1,49 | 1,49 | -2,07 | 2,07 |
| РСН 2 | -4,74 | 4,74 | -1,98 | 1,98 | -2,61 | 2,61 |
| РСН 3 | -4,65 | 4,65 | -1,93 | 1,93 | -2,56 | 2,56 |

На рис. 5.7-5.12 наведено епюри діаграми, що відображають дані із таблиць 5.2-5.7.

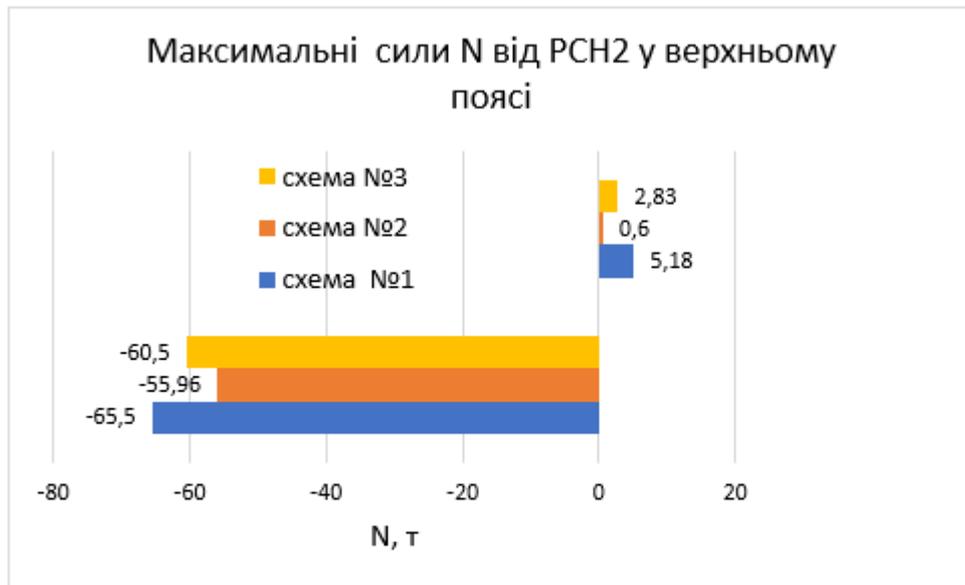


Рис. 5.7 Максимальні зусилля N(т) в стержнях конструктивної групи «верхній пояс» від РСН 2

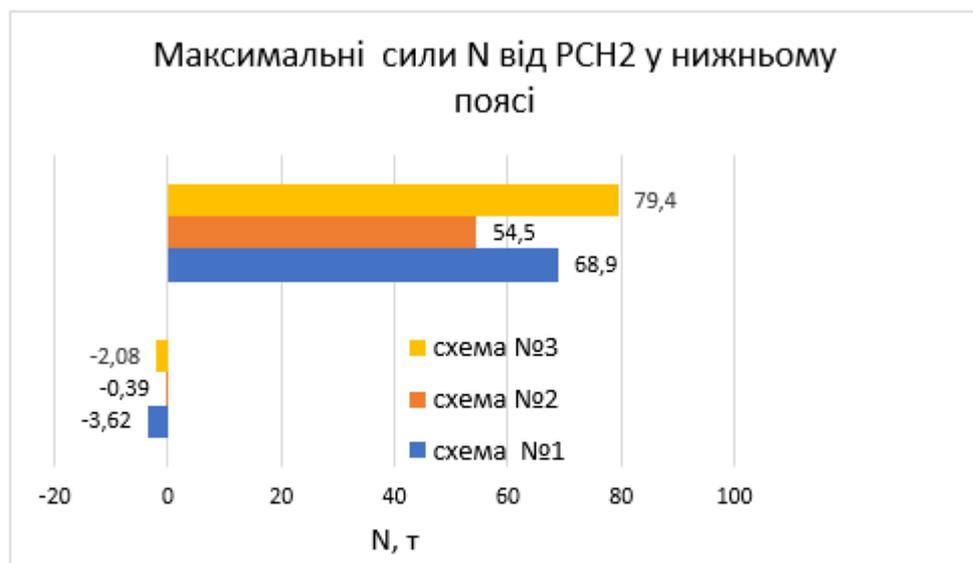


Рис. 5.8 Максимальні зусилля N(т) в стержнях конструктивної групи «нижній пояс» від РСН 2

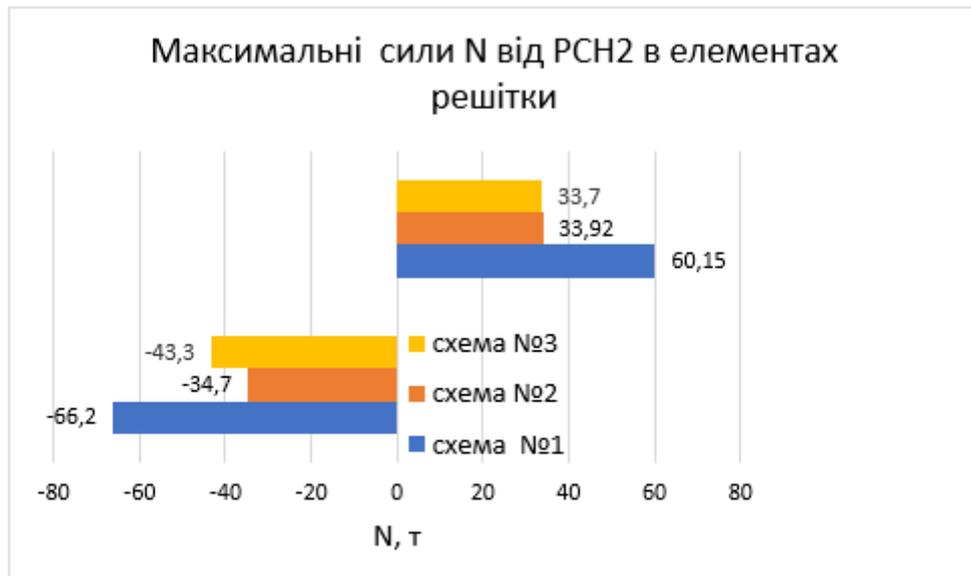


Рис. 5.9 Максимальні зусилля N(τ) в стержнях конструктивної групи «решітка» від РСН 2

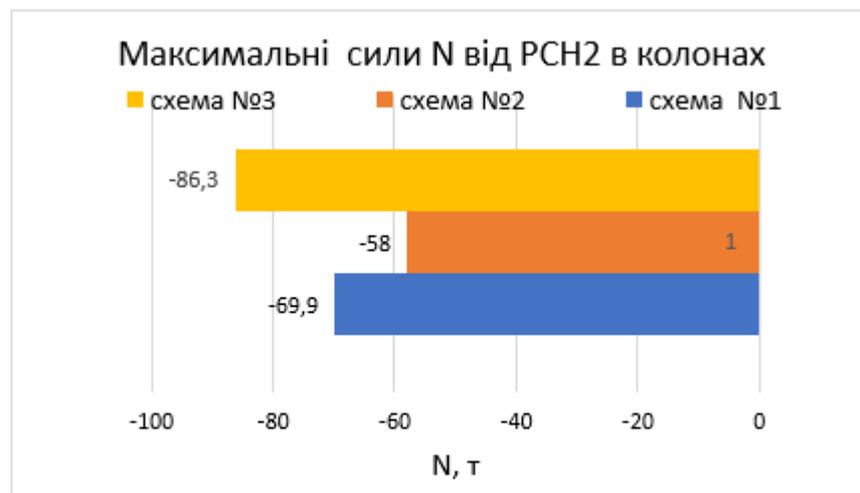


Рис. 5.10 Максимальні зусилля N(τ) в стержнях конструктивної групи «колони» від РСН 2

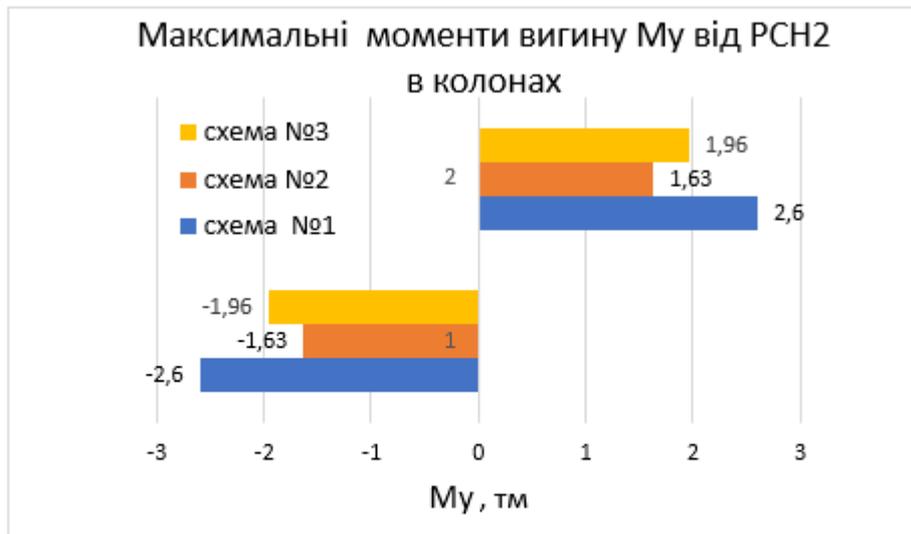


Рис. 5.11 Максимальні зусилля M_y (т·м) в стержнях конструктивної групи «колони» від РСН 2

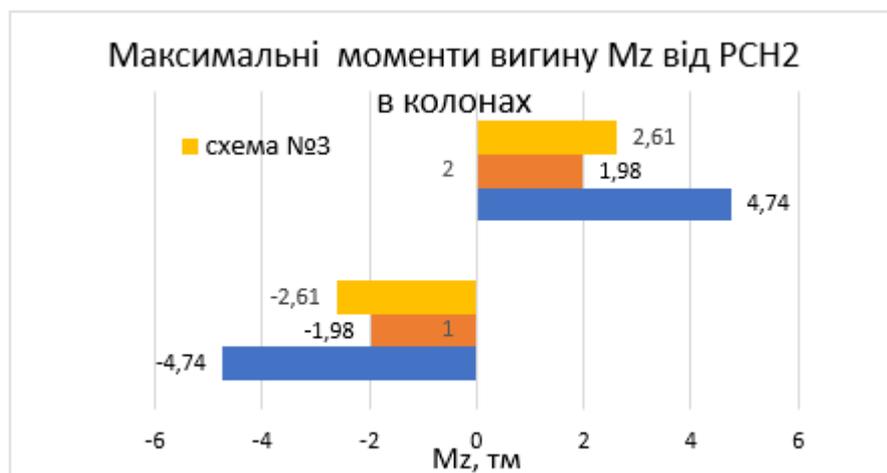


Рис. 5.12 Максимальні зусилля M_z (т·м) в стержнях конструктивної групи «колони» від РСН 2

Як видно із графіків на рис.5.7-5.12 в моделі №3 в елементах нижнього та верхнього поясів виникають найбільші стискаючі та розтягуючі зусилля відповідно. Але осьові зусилля в похилих стержнях решітки є найменшими.

На рис. 5.13-5.15 наведено мозаїки використання несучої здатності перерізу (γ %) для конструктивних груп стержнів за першою групою граничних станів для металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності

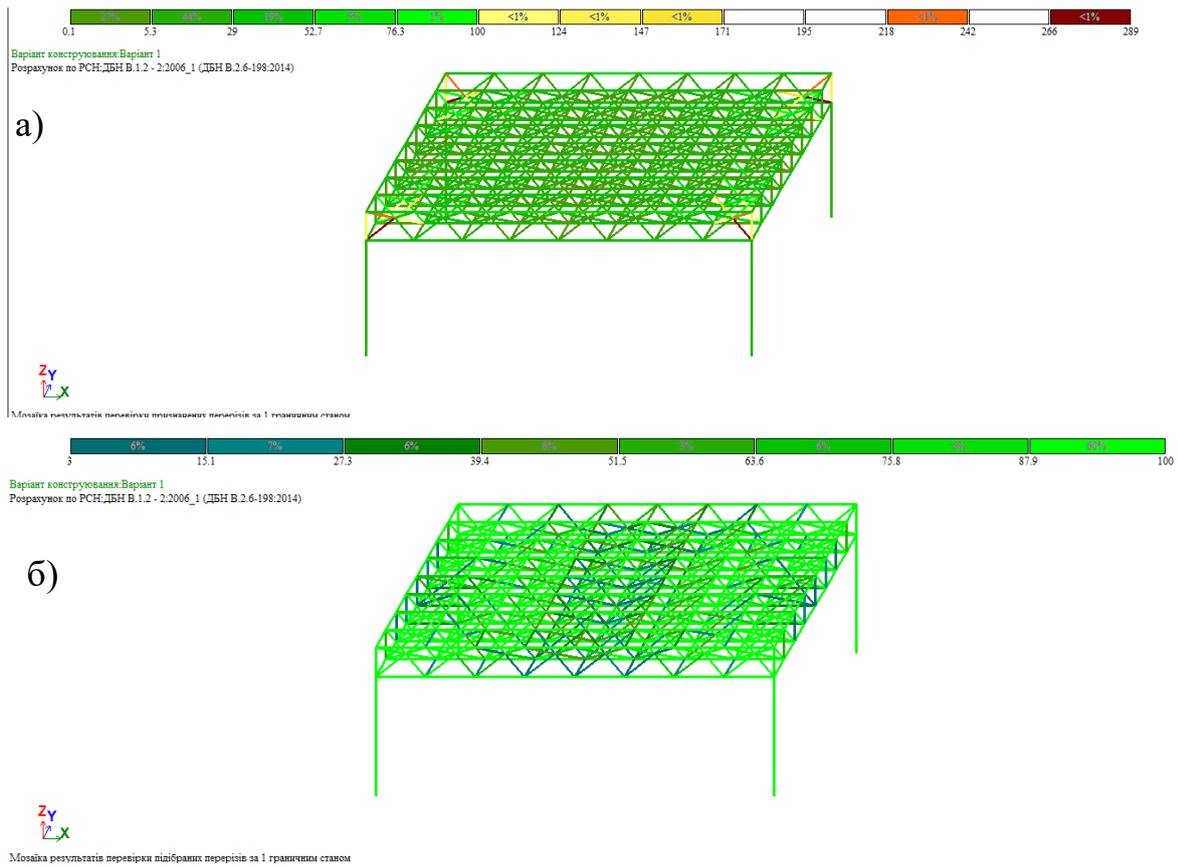
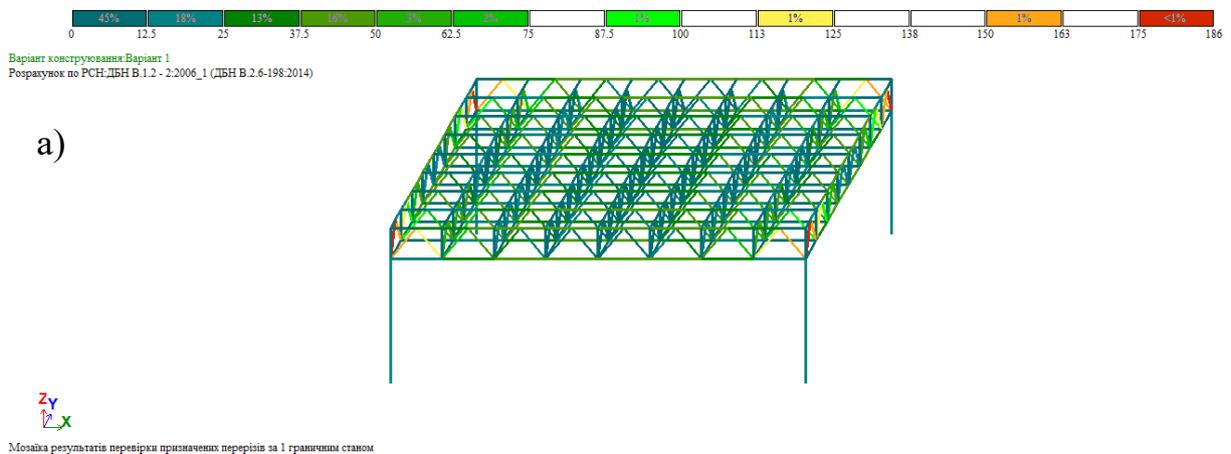


Рис. 5.13 Мозаїка результатів для схеми №1: при розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності -а; мозаїка результатів розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що є підібраними в модулі «Метал»-б



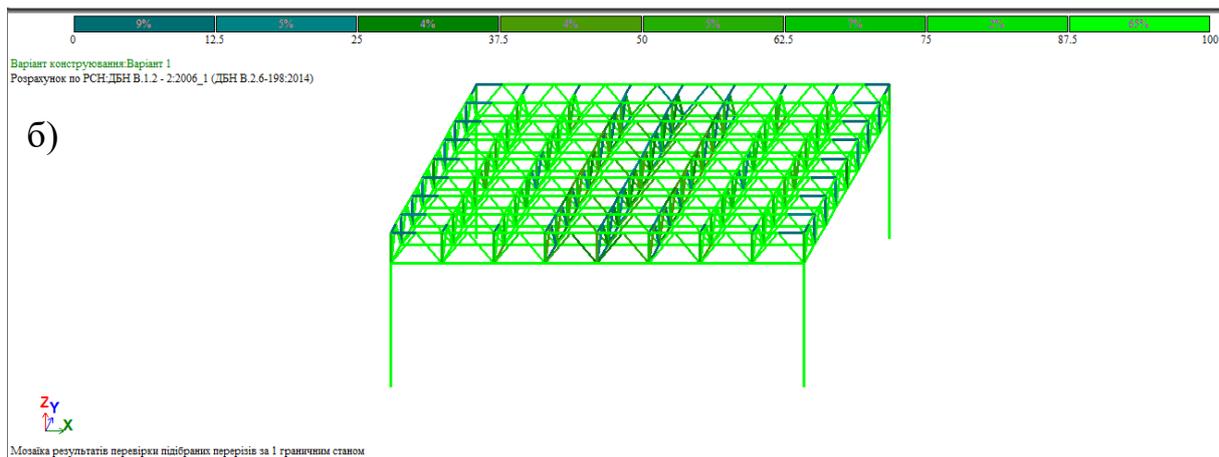


Рис. 5.14 Мозаїка результатів для схеми №2: при розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності -а; мозаїка результатів розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що є підібраними в модулі «Метал»-б

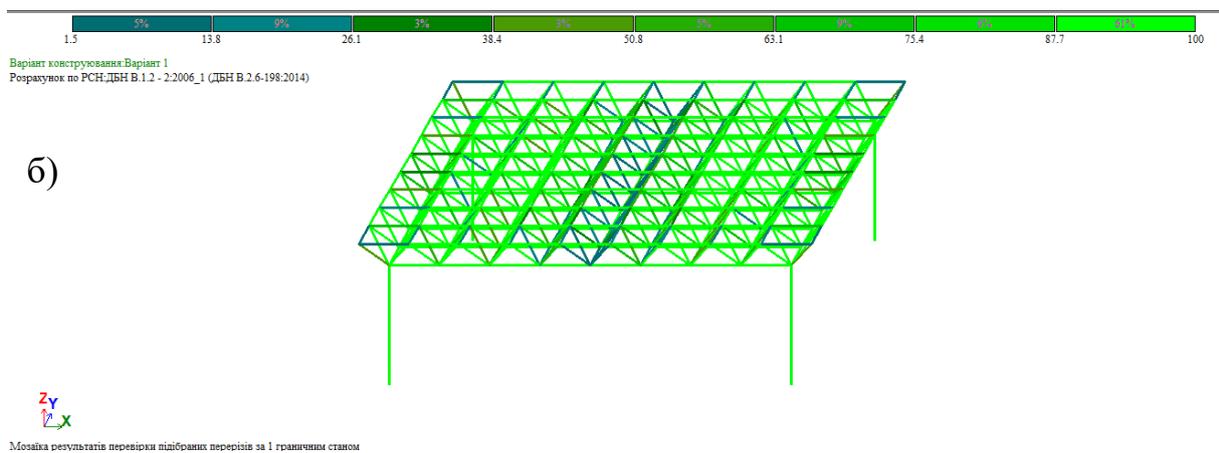
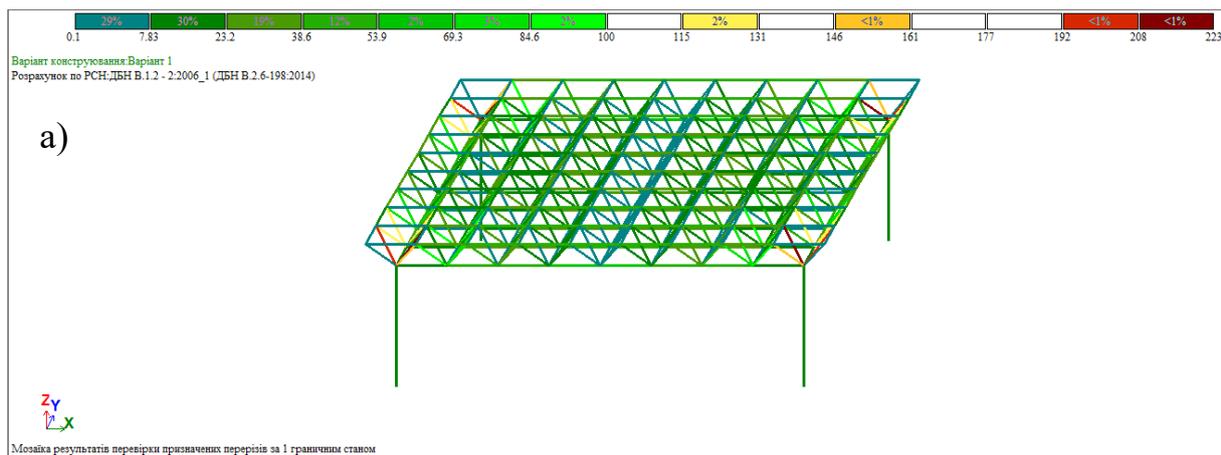


Рис. 5.15 Мозаїка результатів для схеми №3: при розрахунку за 1ГС металевих елементів з поперечним перерізами, що призначені у вихідних даних, % несучої здатності -а; мозаїка результатів розрахунку за 1ГС

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

У таблиці 5.8 приведено максимальний % використання перетину після 1-го ітераційного розрахунку в статичній постановці.

Таблиця 5.8 – Максимальне використання, (%) перерізу після 1-ї ітерації, що призначені у вихідних даних

| Назва конструктивної групи стержнів | 1 ГС | | | 2ГС | | |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Схема №1 | Схема №2 | Схема №3 | Схема №1 | Схема №2 | Схема №3 |
| Верхній пояс | 57,1 | 49,6 | 52,8 | 35,8 | 17,7 | 35,5 |
| Нижній пояс | 49,7 | 47,8 | 54 | 35,3 | 23,5 | 23,5 |
| Решітка | 73,6 | 75 | 84,6 | 88,3 | 71,3 | 98,3 |
| Колони | 26,5 | 19,6 | 22,6 | 4,8 | 4,8 | 4,8 |

а)



б)



в)





5.16 Максимальне використання, (%) перерізів колон за 1 ГС після 1-ї ітерації, що призначені у вихідних даних для груп стержнів: верхнього поясу-а; нижнього поясу-б; розкосів-в; колон-г

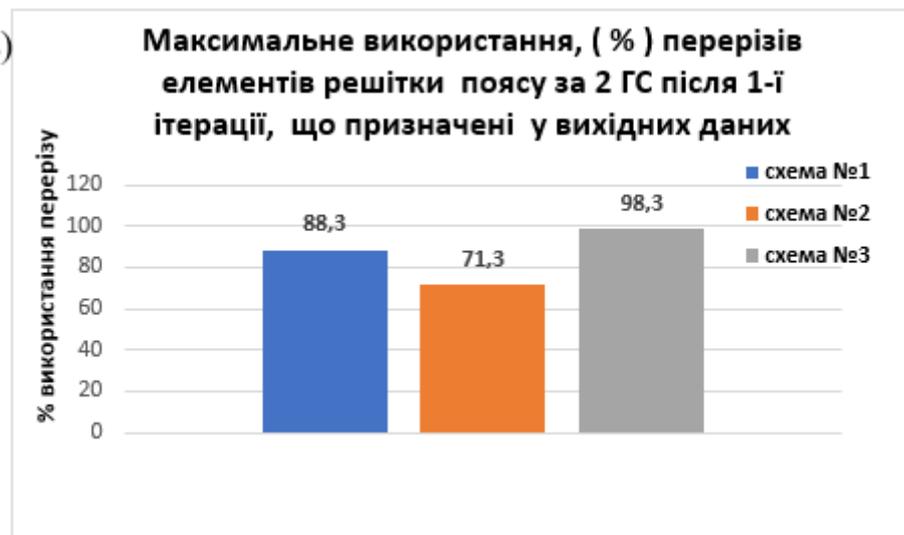
Так, із рис.5.16 видно, що при початкових (заданих) жорсткостях стержнів найбільш повно використана несуча здатність елементів решітки в моделі №3. Цей факт робить цю модель на рівні аналізу повноти використання перерізів стержнів моделі найбільш ефективною.



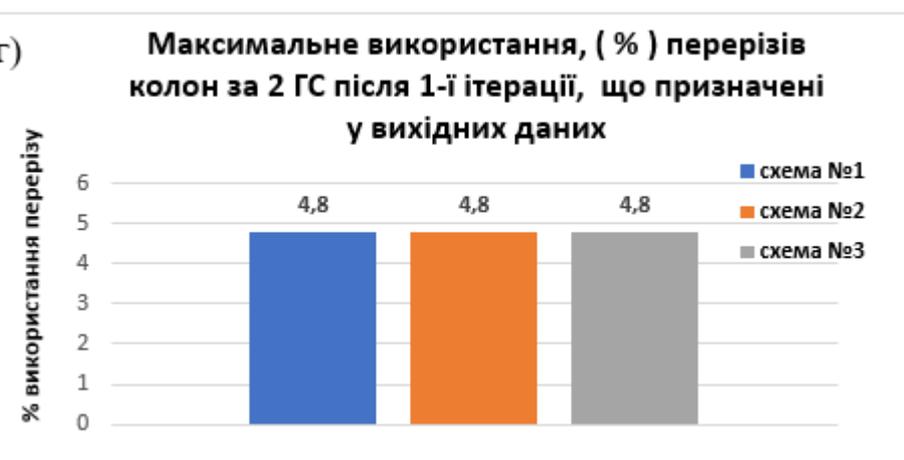
б)



в)



г)



5.17 Максимальне використання, (%) перерізів колон за 2 ГС після 1-ї ітерації, що призначені у вихідних даних для груп стержнів: верхнього поясу-а; нижнього поясу-б; розкосів-в; колон-г

5.3 Підбір нових перерізів стержнів для груп конструктивних елементів моделей, що досліджуються

В таблицях 5.9-5.13 після 1-ї ітерації згідно результатів статичного розрахунку приведено дані підбору нових перерізів трубчатого типу для усіх груп конструктивних груп елементів моделей, що досліджуються.

Таблиця 5.9 Підбір елементів **верхнього** поясу після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

| № схеми | № типу перерізу | Сталь | Профіль труби | Вага Ім.п. профілю, т | Довжина стержнів поясу, м | Вага, т |
|---------|-----------------|-------|---------------|-----------------------|---------------------------|---------|
| 1 | 1 | C235 | ТБ 194*5 | 0,0232956 | 324 | 7,55 |
| 2 | 1 | C235 | ТБ 168*5,5 | 0,022032 | 324 | 7,14 |
| 3 | 1 | C235 | ТБ 180*5 | 0,02157 | 405 | 8,74 |

Таблиця 5.10 Підбір елементів **нижнього** поясу після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

| № схеми | № типу перерізу | Сталь | Профіль труби | Вага Ім.п. профілю, т | Довжина стержнів поясу, м | Вага, т |
|---------|-----------------|-------|---------------|-----------------------|---------------------------|---------|
| 1 | 1 | C235 | ТБ 146*5,5 | 0,0190494 | 324 | 6,17 |
| 2 | 1 | C235 | ТБ 152*6 | 0,021595 | 324 | 6,99 |
| 3 | 1 | C235 | ТБ 152*7 | 0,025021 | 324 | 8,11 |

Таблиця 5.11 Підбір елементів **решітки** після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

| № схеми | № типу перерізу | Сталь | Профіль труби | Вага 1м.п. профілю, т | Довжина стержнів поясу, м | Вага, т |
|---------|-----------------|-------|---------------|-----------------------|---------------------------|---------|
| 1 | 1 | C235 | ТБ 133*7,5 | 0,0232032 | 1118,6 | 25,96 |
| 2 | 1 | C235 | ТБ 140*4,5 | 0,015031 | 1244,04 | 18,7 |
| 3 | 1 | C235 | ТБ 146*4,5 | 0,015697 | 797,04 | 12,51 |

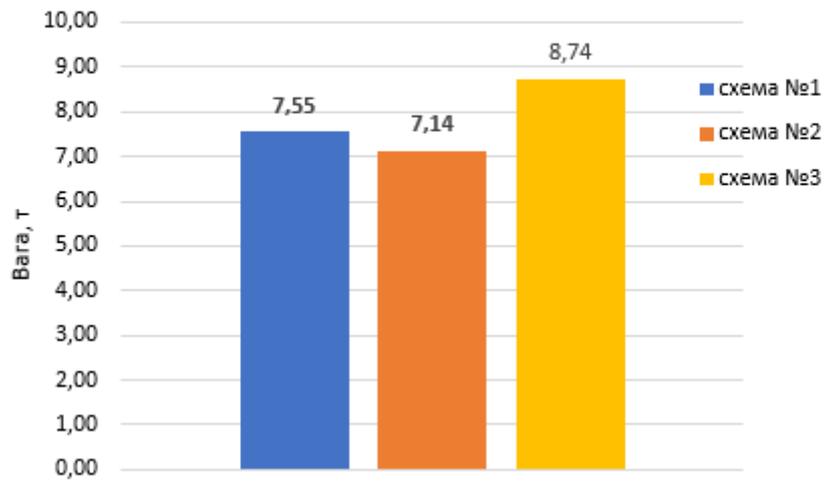
Таблиця 5.12 Підбір **колон** після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

| № схеми | № типу перерізу | Сталь | Профіль труби | Вага 1м.п. профілю, т | Довжина стержнів поясу, м | Вага, т |
|---------|-----------------|-------|---------------|-----------------------|---------------------------|---------|
| 1 | 1 | C235 | ТБ 273*8 | 0,0522611 | 28,8 | 1,51 |
| 2 | 1 | C235 | ТБ 245*7 | 0,041069 | 28,8 | 1,18 |
| 3 | 1 | C235 | ТБ 273*7 | 0,045901 | 28,8 | 1,32 |

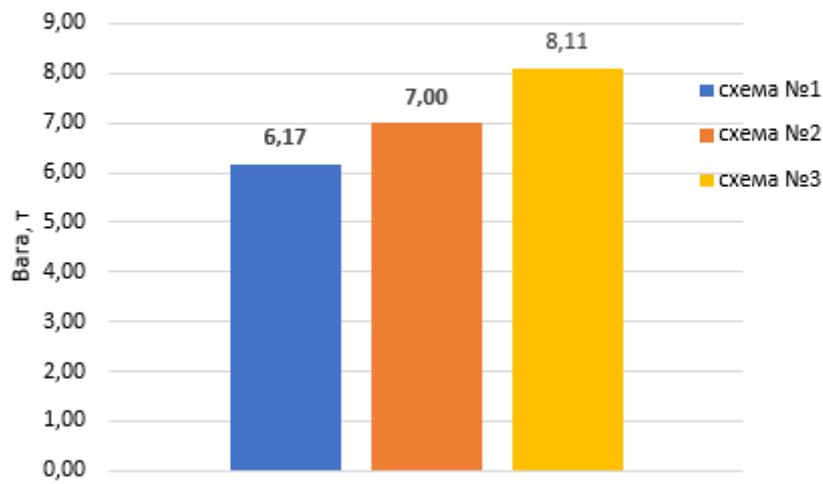
Таблиця 5.13 **Підрахунок ваги моделей**

| Назва групи конструктивних елементів | Модель №1 | Модель №2 | Модель №2 |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Верхній пояс | 7,55 | 7,14 | 8,74 |
| Нижній пояс | 6,17 | 7,00 | 8,11 |
| Розкоси | 25,96 | 18,7 | 12,51 |
| Вага структурної плити без врахування ваги колон: | | | |
| Колони | 1,51 | 1,18 | 1,32 |
| Всього: | 41,19 | 34,02 | 30,68 |

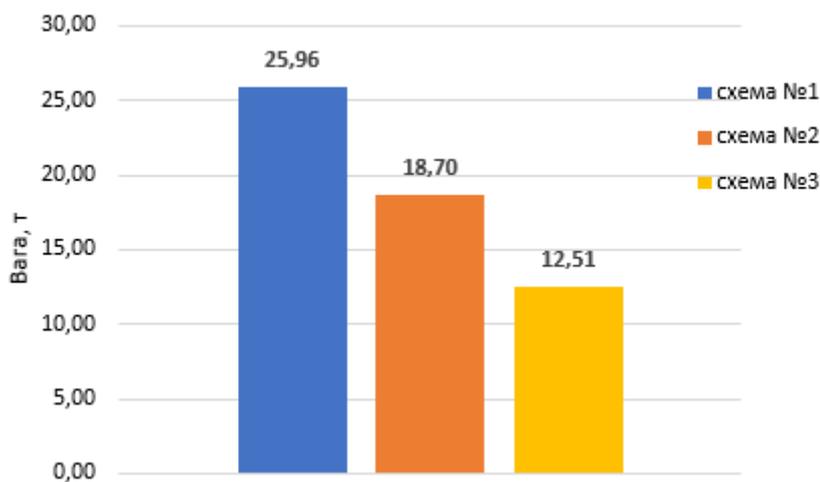
Вага верхнього поясу (т)



Вага нижнього поясу (т)



Вага стержнів решітки (т)



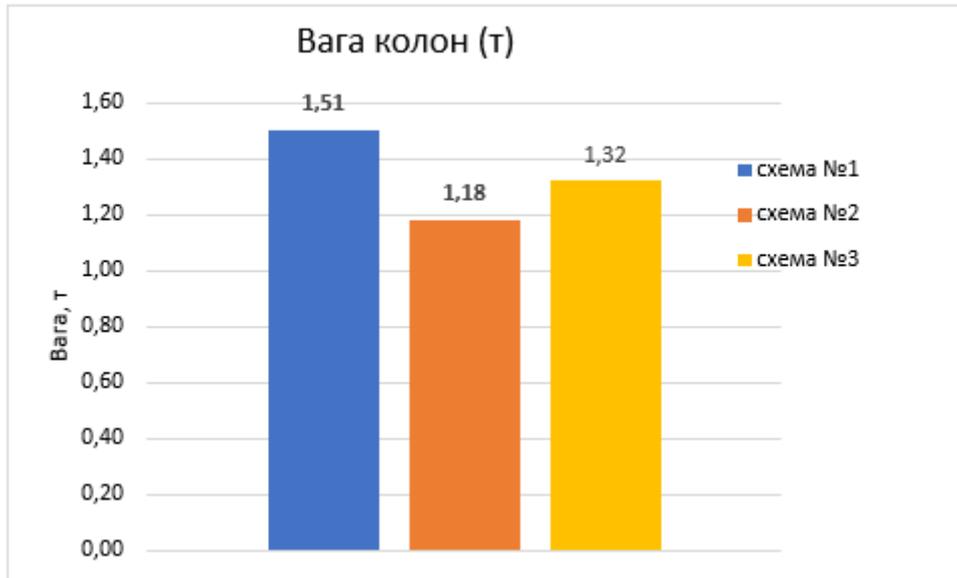


Рис.5.18 Вага конструктивних груп стержнів, для моделей, що досліджуються: верхнього поясу-а; нижнього поясу-б; розкосів-в; колон-г

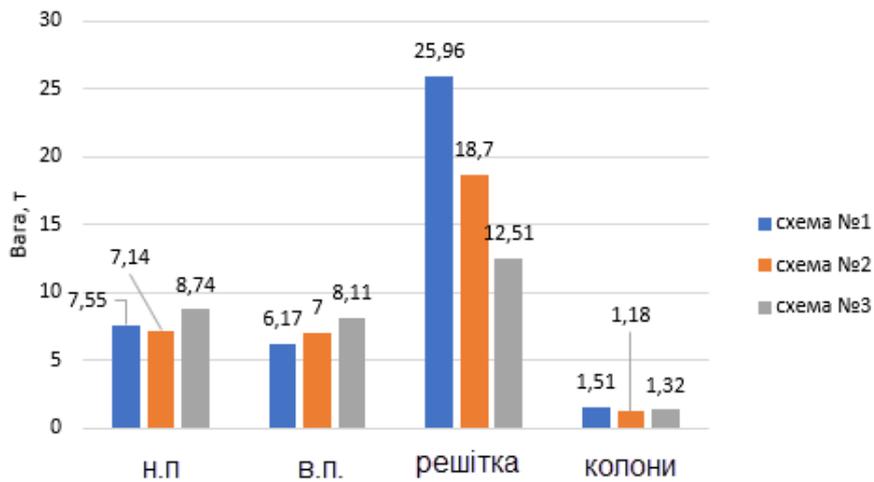


Рис. 5.19 Підрахунок ваги конструктивних груп стержнів

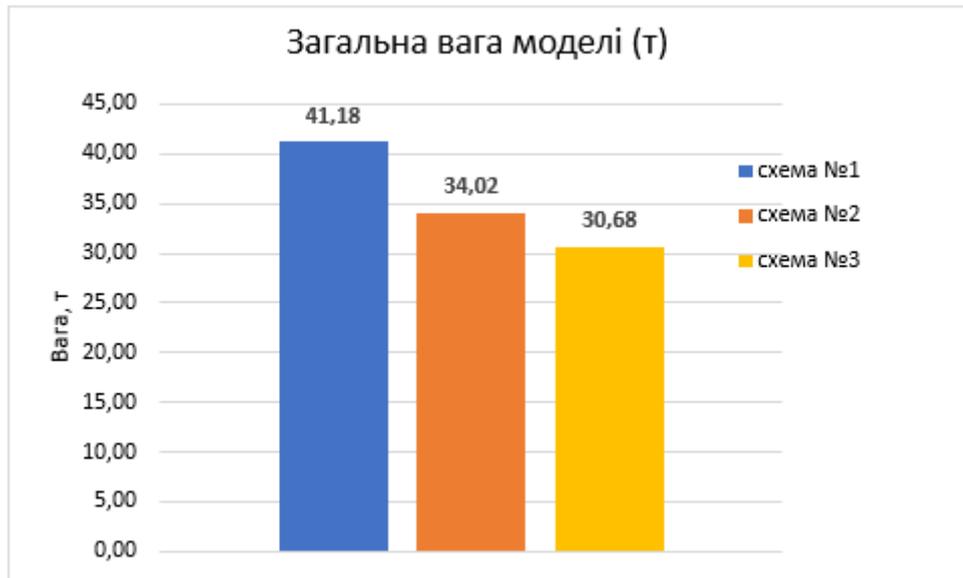


Рис.5.20 Загальна вага моделей

РОЗДІЛ 6. ВИСНОВКИ

1. Структурну плиту покриття можна охарактеризувати як ефективну раціональну конструкцію покриття, що дозволяє перекривати значні прольоти без улаштування додаткових опор. Також такій конструкції притаманні висока жорсткість, технологічних (наявність уніфікованих елементів).
2. Ефективність роботи обумовлена природою самої стержньової структури, а саме – мультиплікацією базового (одиночного елемента) вздовж осей горизонтальної площини XOY.
3. Зміна геометричних параметрів конструкції плити значним чином впливає на напружено-деформований стан стержнів плити. Так форма базового (одиночного) елемента, що мультиплікується, значним чином впливає на напружено-деформований стан при збереженні решти параметрів та умов.
4. Серед розглянутих трьох моделей плит, що відрізняються одна від одної лише одним параметром – формою базового елемента була визначена найбільш ефективна конструкція за параметром статичної роботи та за критерієм матеріалоемності.

5. Так, аналізуючи НДС стержнів верхнього поясу, слід відмітити, що напруження в цих поясах для моделей №1 та №2 є більшими на 8,26% та 17% відповідно в порівнянні із напруженнями у верхньому поясі моделі №3 (табл. 6.2).
6. Аналізуючи НДС стержнів нижнього поясу, слід відмітити, що напруження в нижньому поясі в моделі №3 є більшим, ніж сила розтягу в моделях №1 та №2 на 15,24 % та 45,7% відповідно (табл. 6.3).
7. Найбільш напруженими є елементи решітки для моделі №1 в порівнянні із осьовими силами розтягу (стиску), що виникають в моделях №2 та 3 (відповідно на 90,8% та 52,9% для зусиль стиску та 77,3% та 78,5%).
8. Найбільш напруженими є колони для моделі №3 в порівнянні із напруженнями в колонах для моделей №№1 та 2.
9. Підбір перерізів для конструктивних груп стержнів конструкції показав наступні результати. Так, підбір елементів **верхнього** поясу моделей, що досліджуються, після ітераційного розрахунку №1 показав, що найбільшу вагу має верхній пояс моделі №3 (на 15,8% та 22,4% він є важчим, ніж у моделей №1 та №2 відповідно)
10. Підбір перерізів для конструктивних груп стержнів конструкції показав наступні результати. Так, підбір елементів **нижнього** поясу моделей, що досліджуються, після ітераційного розрахунку №1 показав, що найбільшу вагу має верхній пояс моделі №3 (на 7,4 % та 13,6% він є важчим, ніж у моделей №1 та №2 відповідно)
11. Але вага елементів решітки для моделі №3 в порівнянні із моделями №1 та 2 , є найменшою, що і обумовлює в решті -решт загальну вагу моделі №3, яка виявилася найменшою в порівнянні із моделями №1 та №2 (на 107,5% та 38,8% відповідно).

12. Вага колон моделей є величиною майже одного порядку та є найменшою для моделі №2
13. Аналізуючи сумарну вагу всіх елементів моделі робимо висновок, що **модель із формою кристалу 3-го типу є найлегшою** в порівнянні із вагою моделі №1 та №2 відповідно (на 34,2% в порівнянні із моделлю №1 та на 21% в порівнянні із моделлю №2). Отже, керуючись лише одним змінним критерієм-формою базового елемента при інших незмінних параметрах, слід зробити висновок, що такий критерій може суттєво вплинути як на НДС системи так і на матеріалосміність варіанту плити, що досліджується.

Література

1. Sribniak Nataliia Напружено-деформований стан структурної плити / Nataliia Sribniak, Liudmyla Tsyhanenko, Hennadii Tsyhanenko, Serhii Halushka // ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Полтава: ПНТУ, 2020. – Т. 2 (55). – С. 35-43. – doi:<https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2339>.
2. Кагановский Л.О. Нові рішення вузлових з'єднань стрижнів структурних та одношарових гратчастих конструкцій / Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту у сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – Випуск 5, 2010 р.192 с.
3. Міняйленко І.В., Васюта В.Б. Ресурсомісткість як головний критерій ресурсозбереження на виробництві. /Мукачівський державний університет. Економіка і суспільство. Випуск # 9 / 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://surl.li/euxbe>
4. Makowski, Z. S. Raumliche Tragwerke aus Stahl. Düsseldorf, 1963
5. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. К.: Мінрегіон України, 2014. 15 с. (Національний стандарт України)
6. ДСТУ 8938:2019 Труби сталеві безшовні гарячедеформовані
7. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. [Чинний від 2007-01-01] К.: Мінбуд України, 2006. (Національний стандарт України)
8. Tsyhanenko, Liudmyla, Sribniak, Nataliia, Tsyhanenko, Hennadii, Lutskovskyi, Valerii and Ordon-Beska, Beata. "Determining the optimal size of the basic element in a space grid structure" Construction of Optimized Energy Potential Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym, vol.12, no.1, 2023, pp.201-208. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.22>.

9. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження та впливи. Норми проектування
10. Chilton J. (1999). Space Grid Structures. Routledge
<https://doi.org/10.4324/9780080498188>
11. Ashtul S.A. & Patil S.N. (2020). Review on Study of Space Frame Structure System. International Research Journal of Engineering and Technology, 7(4)
12. Space Frame Structure; an analysis of its benefit by Constro Facilitator. Retrieved from: <http://surl.li/ogzyc>
13. Li Z.X. (2013). Structure Mechanics Analysis with Different Construction Schemes in Large-Span Space Grid Structure. Advanced Materials Research, 788, 534–537 .
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.788.534>
14. Murtha-Smith E. & Bean J.E. (1989). Double Layer Grid Space Frame Buckling. International Journal of Space Structures, 4(3),117-127
<https://doi.org/10.1177/026635118900400301>
15. Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "Space frame". Encyclopedia Britannica, Retrieved from: <http://surl.li/ogzxo>
16. Space Frame | Components of Space Frame System | Types of Space Frame | Advantages & Disadvantages of Space Frame Structure | Space Frame Structures Examples. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://civiljungle.com/space-structure/>
17. Huybrechts S. & Tsai S.W. (1996). Analysis and behavior of grid structures. Composites Science and Technology, 56(9), 1001-1015
[https://doi.org/10.1016/0266-3538\(96\)00063-2](https://doi.org/10.1016/0266-3538(96)00063-2)
18. Zhou Z., Wu J., Meng Sp. et al. (2012). Construction process analysis for a single-layer folded space grid structure in considering time-

dependent effect. International Journal Steel Structures, 12, 205-217
<https://doi.org/10.1007/s13296-012-2005-y>

19. Структурні плити конструкції ЦНІСК. URL:
<https://jak.bono.odessa.ua/articles/strukturni-pliti-konstrukcii-cniisk.php>
20. Fu F., Parke G.A.R. (2018). Assessment of the Progressive Collapse Resistance of Double-Layer Grid Space Structures Using Implicit and Explicit Methods. International Journal Steel Structures, 18, 831-842
<https://doi.org/10.1007/s13296-018-0030-1>
21. Flager, F., A. Adya, J. Haymaker and M. Fischer, 2014. Computers and Structures, 131, pp. 1-11.

ДОДАТКИ

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТРУКТУРНОЇ ПЛИТИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФОРМИ БАЗОВОГО ЕЛЕМЕНТУ

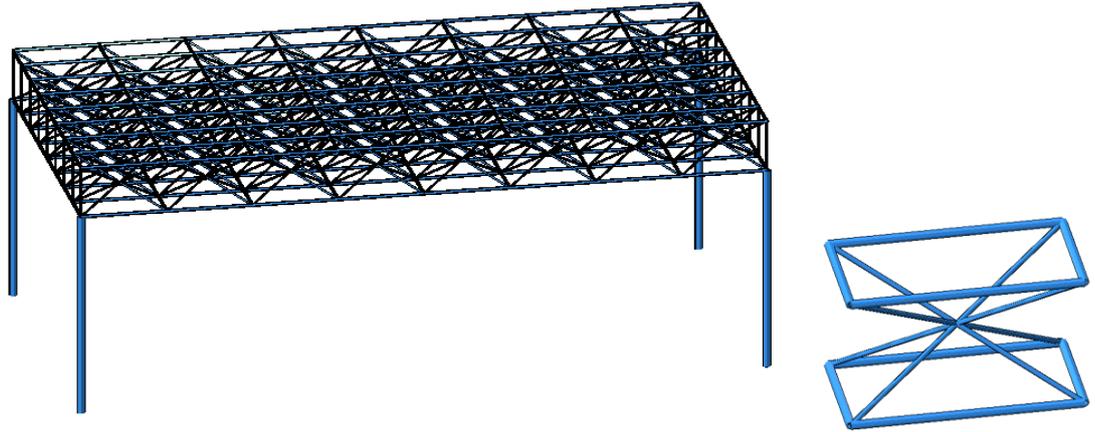
Олефір Ю.М. здобувач 2м курсу спец. «БЦІ», ФБТ
Срібняк Н.М., к.т.н., доцент
Сумський НАУ

Структурні стержневі сталеві плити покриття є ефективним сучасними конструкціями.

Структурні плити широко застосовуються для переkritтя одноповерхових споруд і мають велике різноманіття конструктивних і архітектурних форм. Одним з факторів, що впливає на напружено-деформований стан стержнів плити є форма базового елемента, який обумовлює форму всієї плити.

Виконано дослідження, як форма базового формоутворюючого елемента впливає на напружено-деформований стан всієї конструкції, а значить й на результати конструювання.

а)



б)

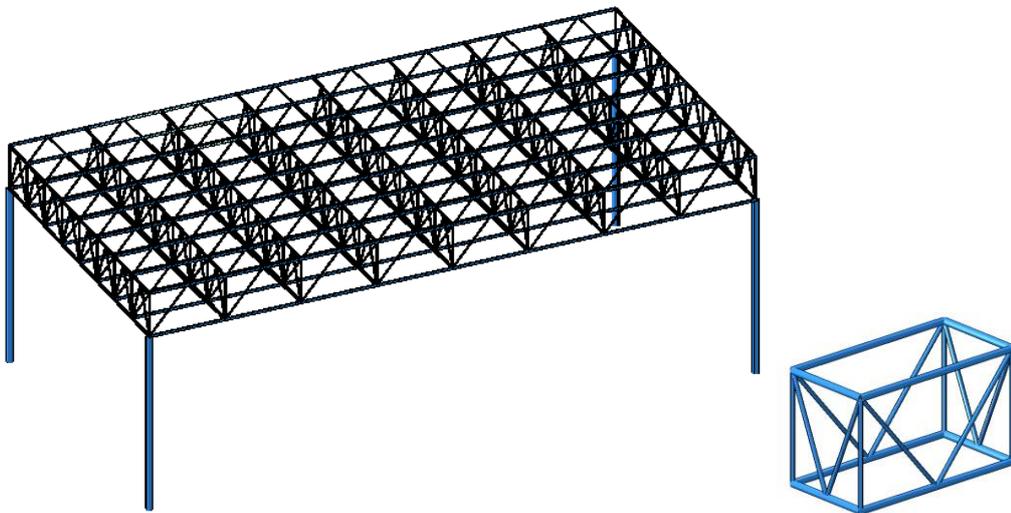


Рис. 1. Моделі сталеві плити покриття, яка досліджується: модель 1 з базовим формоутворюючим елементом 1-го типу-а; модель 2 з базовим формоутворюючим елементом 2-го типу -б

Так, дослідження має на меті встановити, який з-поміж двох варіантів є найменш матеріалоемним, тобто яка з двох конструкцій має найменшу вагу.

Література

1. Chilton J. Space Grid Structures. Routledge, 2007. URL: <https://doi.org/10.4324/9780080498188> (date of access: 16.04.2024).

Сумський національний аграрний університет
Кафедра будівельних конструкцій

Дослідження роботи структурної плити в залежності від базового елементу

Здобувач: Олефір Ю.М.

Керівник: к.т.н., доцент Срібняк Н.М.

Метою числового експерименту є виявлення форми базового елемента (при всіх інших сталих параметрах будівельної системи) на напружено-деформований стан конструкцій та вресі-ресі на *матеріалоємність* моделей, що досліджуються.

Задачі дослідження задля досягнення поставленої мети:

- 1)** дослідити особливості роботи структурної сталевий плити покриття під навантаженням; виокремити чинники, що впливають на напружено-деформований стан конструкції;
- 2)** прийняти тип базового (одиночного) елемента, що є формоутворюючим для плити, як фактор, від якого буде залежати напружено-деформований стан конструкції;
- 3)** створення із використанням методу скінчених елементів на базі ПК ЛІРА-САПР трьох скінченоелементних схем структурної плити, які будуть відрізнятися лише за одним параметром – формою базового гратчастого формоутворюючого елемента;

Задачі дослідження задля досягнення поставленої мети:

- 4)** задати у першому наближенні (ітерації) величини жорсткості для усіх груп конструктивних груп стержневих елементів для трьох моделей плити, що досліджуються. Ці параметри жорсткості приймаються однаковими;
- 5)** виконати статичний розрахунок (1-ша ітерація), застосувавши жорсткості першого типу для усіх розрахункових схем плити;
- 6)** на основі даних статичного аналізу в модулі «Метал» прийняти нові, запропоновані програмою жорсткості (розміри перерізу труби) усіх конструктивних груп стержнів плити;
- 7)** обчислити згідно нових профілів перерізів із труб стержневих елементів схем плит вагу кожної моделі плити. Визначити модель, яка би мала найменшу матеріалоємність;

Об'єкт дослідження – три моделі структурної стержньової просторої структурної плити розміром в плані 12,0x24,0 м, що відрізняються лише типом (формою) базового кристалічного елемента, за допомоги мультиплікації якого створюється сама плита.

Предметом дослідження є напружено-деформований стан (НДС) розрахункових схем плит, які підлягають дослідженню, їх конструктивне вирішення й матеріалоемність.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати числового дослідження дозволяють визначити із моделей структурної плити, що досліджуються, найбільш ефективну з точки зору найменшої ваги (матеріалоемності) модель.

Апробація та публікація результатів роботи.

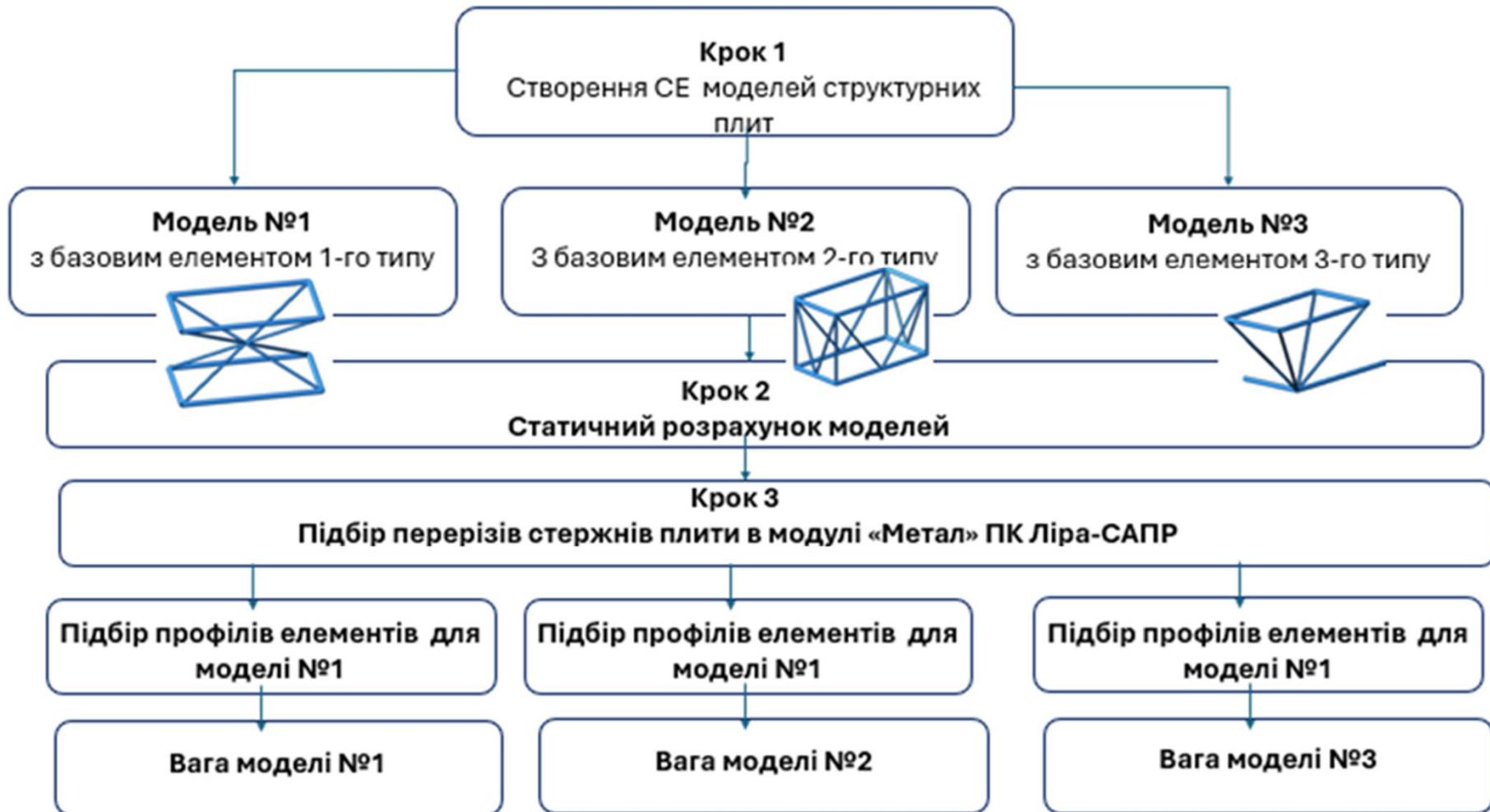
Результати роботи опубліковано в збірнику тез студентсько-викладацької щорічної конференції Сумського національного аграрного університету.

Олефір Ю.М., Срібняк Н.М. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТРУКТУРНОЇ ПЛИТИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФОРМИ БАЗОВОГО ЕЛЕМЕНТУ // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (18-22 листопада 2024 р.) – Суми, 2024

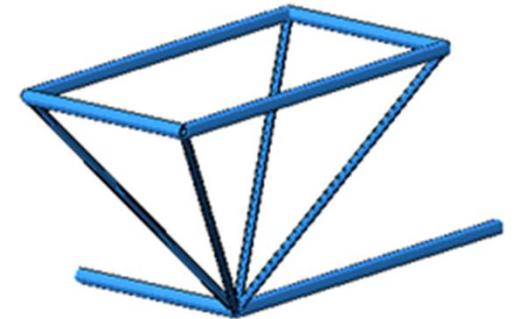
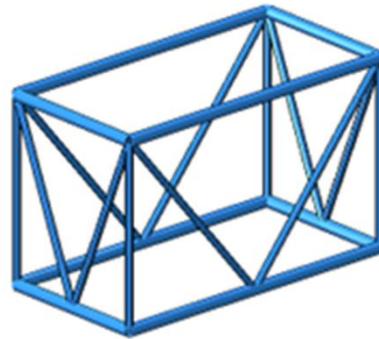
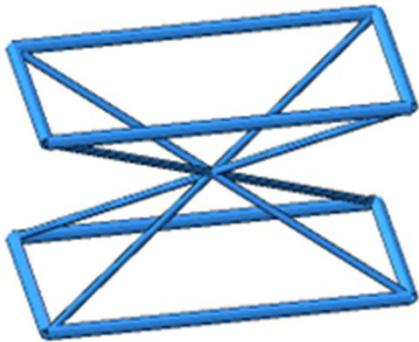
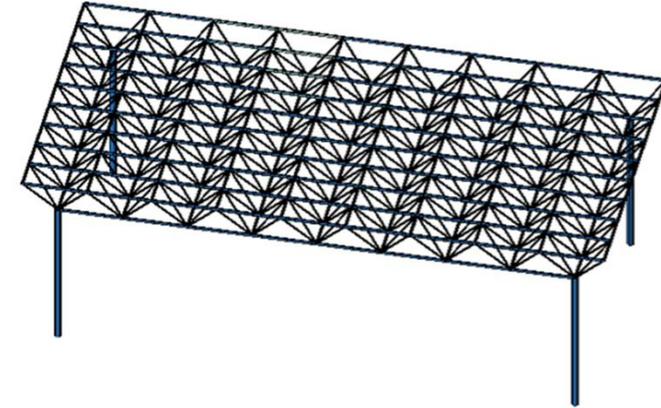
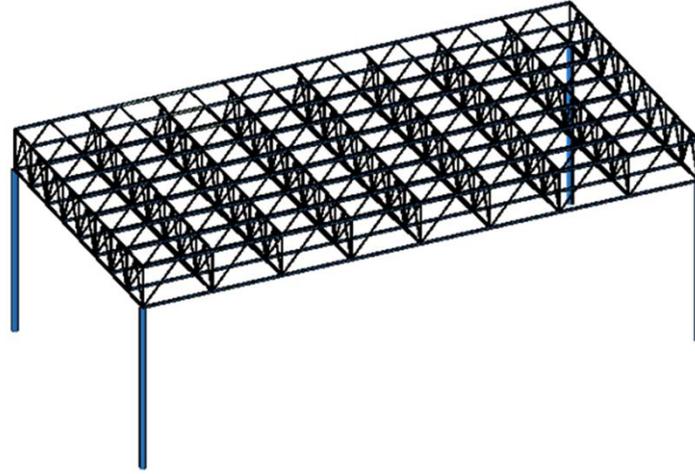
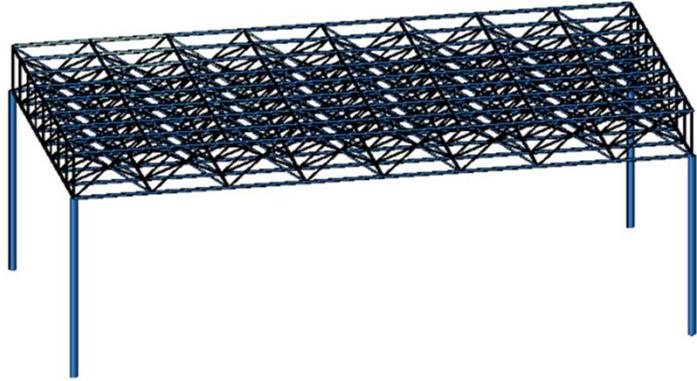
МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

- 1) метод збирання й аналізу даних та інформації** – оцінка інформації щодо стрижневих схем структур, їх сполучення; аналіз рекомендацій щодо вибору оптимальних параметрів розрахунку, аналіз методів регулювання зусиль в стрижнях плитної конструкції.
- 2) застосування методу скінчених елементів**, який є математичним підходом для створення розрахункових моделей, зокрема будівельних конструкцій у програмному комплексі ЛІРА-САПР. Цей метод використовується для визначення напружено-деформованого стану плитних структур, прийнятих до розрахунку.
- 3) використання методу проектування сталевих елементів** у модулі «Метал» ПК ЛІРА-САПР відповідно до норм, з оцінкою відсоткового використання площі перерізу стрижнів згідно з першою та другою граничними станами (1ГС та 2ГМ) за нормами.
- 4) аналітична обробка даних розрахунків** за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel.

Алгоритм проведення числового експерименту в ПК ЛІРА-САПР



Скінченоелементні моделі плити структурного типу, що досліджуються



Вид в площині в площині YOZ для моделей, що досліджуються



схема №1

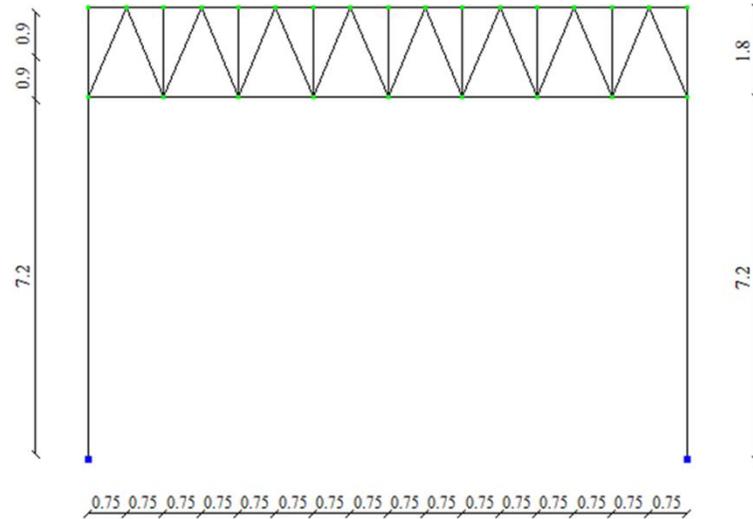


схема №2

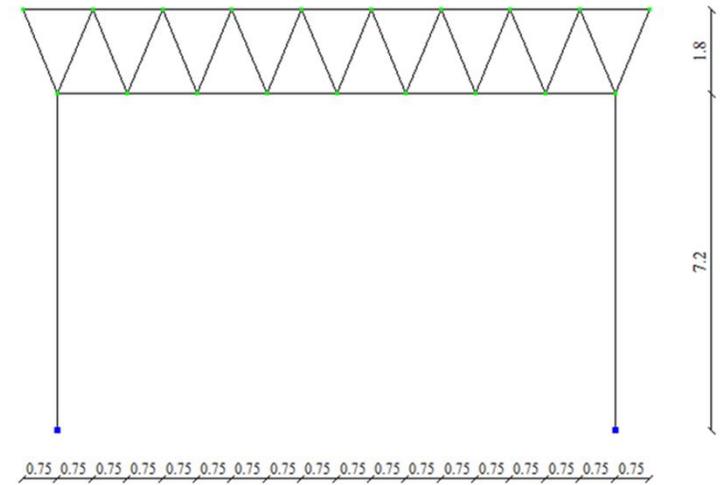


схема №3

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

| Назва елемента | Поперечний переріз, см | E, т/м ² | R, т/м ³ | μ | Сталь С235 | q, т/м |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|-----|------------|---------|
| 1.Стержні верхнього поясу | Труба ТБ 114х20 | 2,1·10 ⁷ | 7,85 | 0,3 | С235 | 0,04634 |
| 2.Стержні нижнього поясу | Труба ТБ 114х20 (ГОСТ 8732 - 78*) | 2,1·10 ⁷ | 7,85 | 0,3 | С235 | 0,04634 |
| 3.Елементи решітки | Труба ТБ 68 х 6 (ГОСТ 8732 - 78*) | 2,1·10 ⁷ | 7,85 | 0,3 | С235 | 0,0092 |
| 4. Колони | Труба ТБ 273 х 40 | 2,1·10 ⁷ | 7,85 | 0,3 | С235 | 0.2298 |

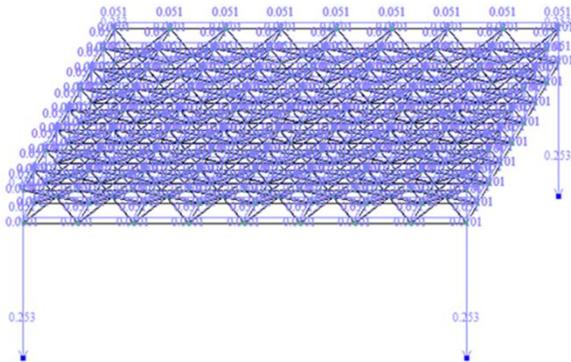
Прийнято *три види завантаження:*

- **Завантаження № 1.** Тип - постійне, власна вага плити, що задавалася автоматично ПК Ліра-САПР й зазнавала змін на кожній ітерації підбору перетинів груп конструктивних елементів

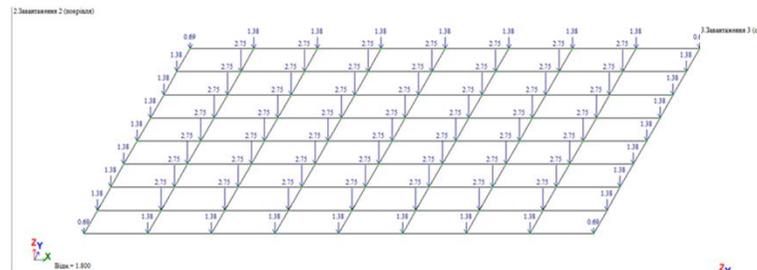
- **Завантаження № 2.** Тип - постійне та являє собою власну вага конструктивних шарів покрівлі (навантаження від покриття (від профнастилу: 0,0914 кН / м² та від прогонів: 0,0903 кН/м),

- **Завантаження № 3.** Тип – тимчасове, сніг: S0=1,67 кН/м²– див. рис.5.5.

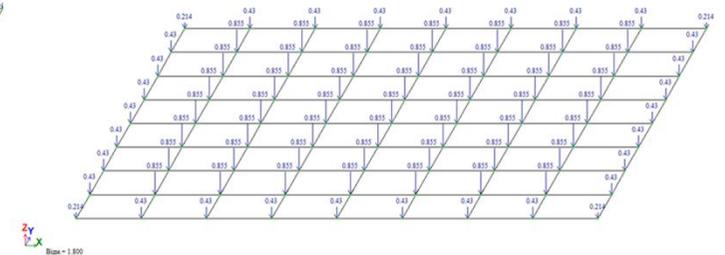
Завантаження №1-власна вага



Завантаження №2-вага конструкції покриття

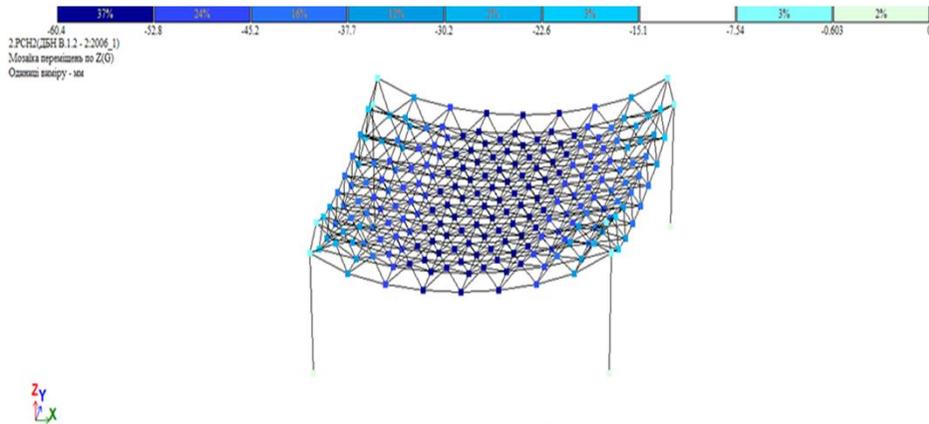


Завантаження №3-вага снігового навантаження

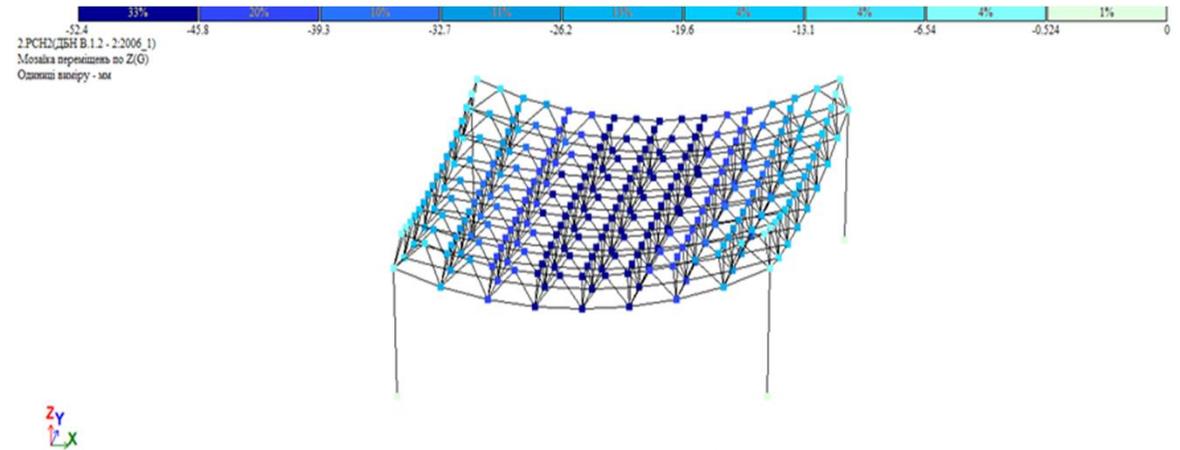


АНАЛІЗ ДАНИХ СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ

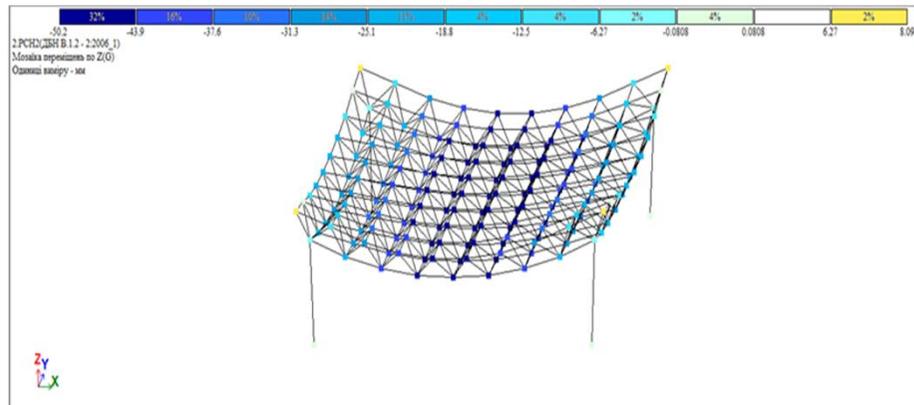
Мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема



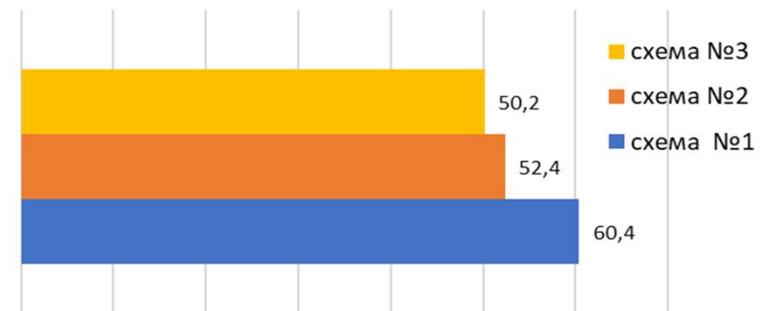
схеми №1



схеми №2

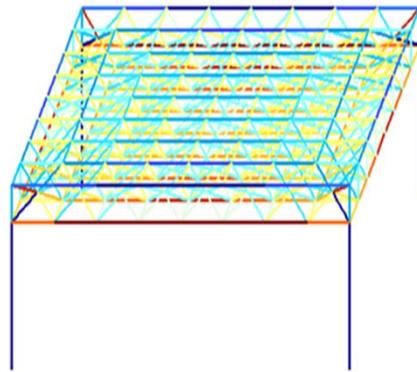
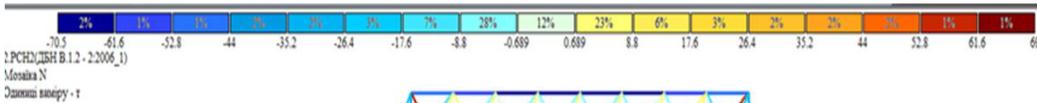


Максимальні переміщенні fz від РСН2

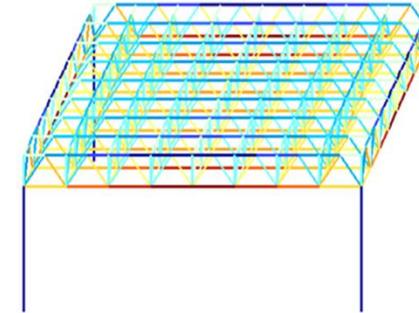
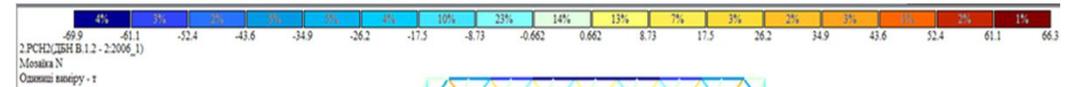


Напружений стан моделей, що досліджуються

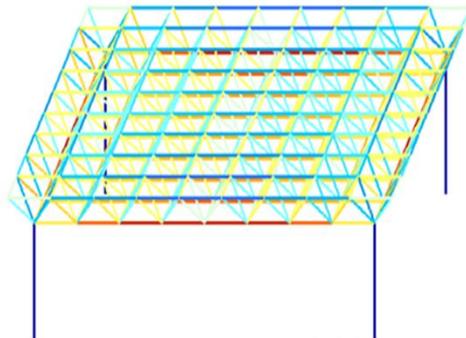
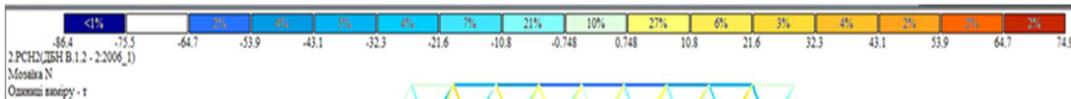
Мозаїка зусиль N у стернях від РСН2



для моделі №1

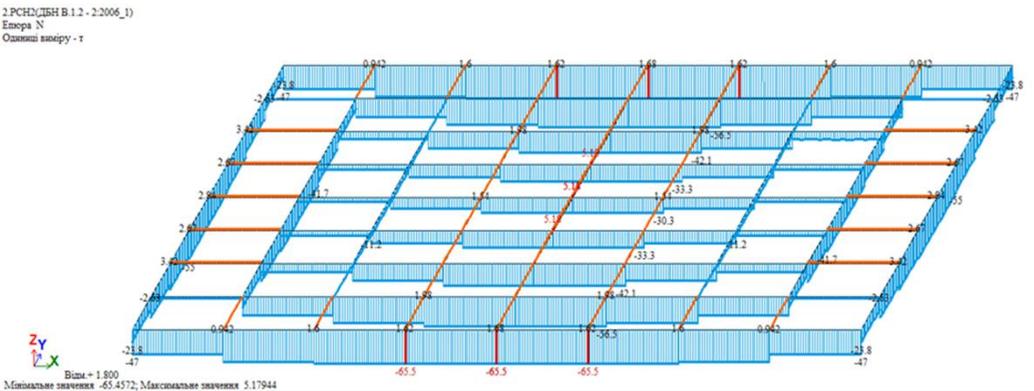


для моделі №2

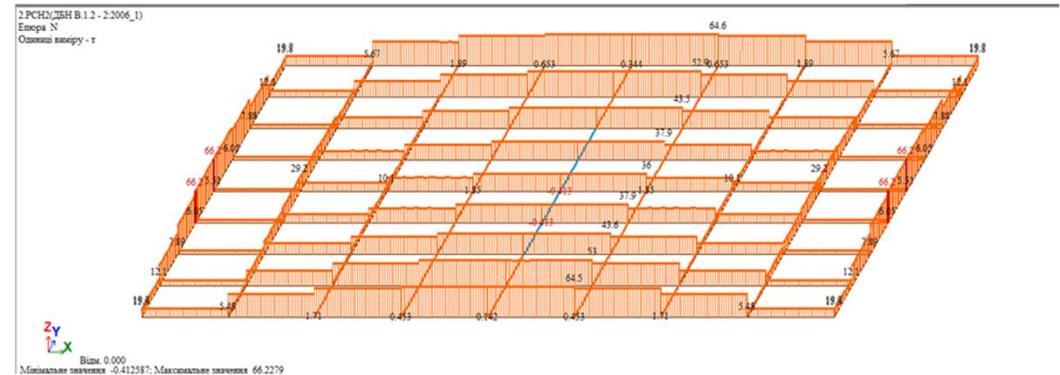


Епюри зусиль N в окремих конструктивних групах стержнів

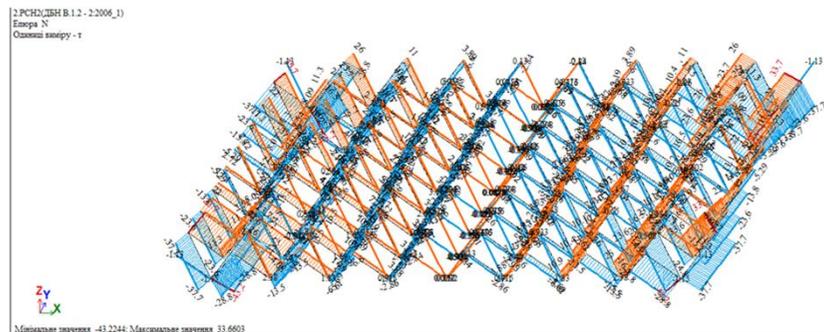
Епюри зусилля N в стержнях верхнього поясу в структурній плиті за моделлю №1



Епюри зусилля N в стержнях нижнього поясу в структурній плиті за моделлю №2

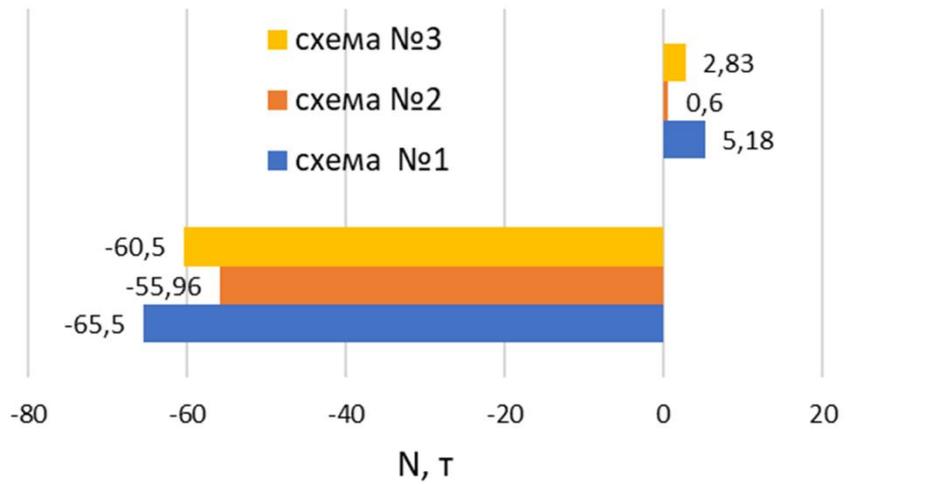


Епюри зусилля N в стержнях решітки в структурній плиті за моделлю №3

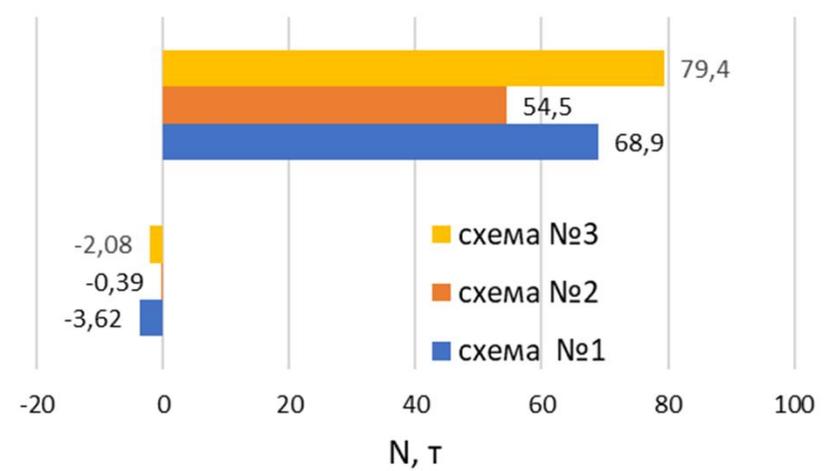


Діаграми максимальних осьових зусиль N

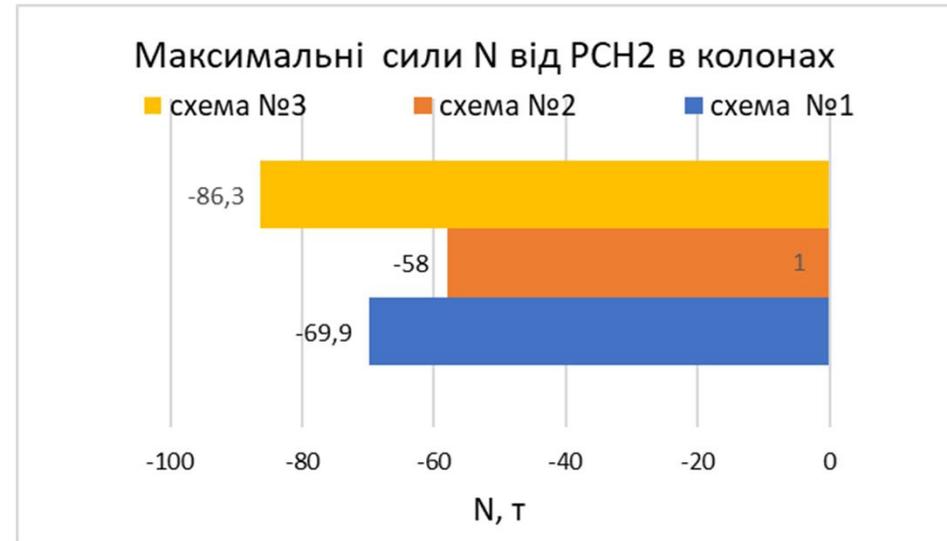
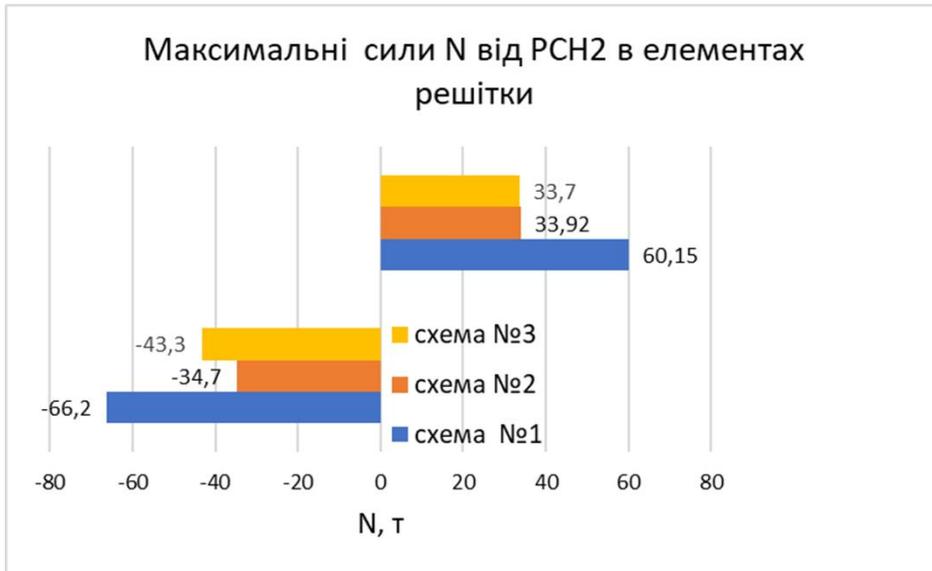
Максимальні сили N від PCH2 у верхньому поясі



Максимальні сили N від PCH2 у нижньому поясі



Діаграми максимальних осьових зусиль N



Максимальний % використання перетину після 1-го ітераційного розрахунку за 1ГС

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

| Назва конструктивної групи стержнів | 1 ГС | | | 2ГС | | |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Схема №1 | Схема №2 | Схема №3 | Схема №1 | Схема №2 | Схема №3 |
| Верхній пояс | 57,1 | 49,6 | 52,8 | 35,8 | 17,7 | 35,5 |
| Нижній пояс | 49,7 | 47,8 | 54 | 35,3 | 23,5 | 23,5 |
| Решітка | 73,6 | 75 | 84,6 | 88,3 | 71,3 | 98,3 |
| Колони | 26,5 | 19,6 | 22,6 | 4,8 | 4,8 | 4,8 |

При початкових (заданих) жорсткостях стержнів найбільш повно використана несуча здатність елементів решітки в моделі №3. Цей факт робить цю модель на рівні аналізу повноти використання перерізів стержнів моделі найбільш ефективною



Підбір нових перерізів стержнів для груп конструктивних елементів моделей, що досліджуються

Таблиця - Підбір елементів **верхнього поясу** після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

| № схеми | № типу перерізу | Сталь | Профіль труби | Вага ім.п. профілю, т | Довжина стержнів поясу, м | Вага, т |
|---------|-----------------|-------|---------------|-----------------------|---------------------------|---------|
| 1 | 1 | C235 | ТБ 194*5 | 0,0232956 | 324 | 7,55 |
| 2 | 1 | C235 | ТБ 168*5,5 | 0,022032 | 324 | 7,14 |
| 3 | 1 | C235 | ТБ 180*5 | 0,02157 | 405 | 8,74 |

Таблиця - Підбір елементів **нижнього поясу** після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

| № схеми | № типу перерізу | Сталь | Профіль труби | Вага ім.п. профілю, т | Довжина стержнів поясу, м | Вага, т |
|---------|-----------------|-------|---------------|-----------------------|---------------------------|---------|
| 1 | 1 | C235 | ТБ 146*5,5 | 0,0190494 | 324 | 6,17 |
| 2 | 1 | C235 | ТБ 152*6 | 0,021595 | 324 | 6,99 |
| 3 | 1 | C235 | ТБ 152*7 | 0,025021 | 324 | 8,11 |

Підбір нових перерізів стержнів для груп конструктивних елементів моделей, що досліджуються

Таблиця - Підбір елементів **елементів решітки** після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

| № схеми | № типу перерізу | Сталь | Профіль труби | Вага 1м.п. профілю, т | Довжина стержнів поясу, м | Вага, т |
|---------|-----------------|-------|---------------|-----------------------|---------------------------|---------|
| 1 | 1 | C235 | ТБ 133*7,5 | 0,0232032 | 1118,6 | 25,96 |
| 2 | 1 | C235 | ТБ 140*4,5 | 0,015031 | 1244,04 | 18,7 |
| 3 | 1 | C235 | ТБ 146*4,5 | 0,015697 | 797,04 | 12,51 |

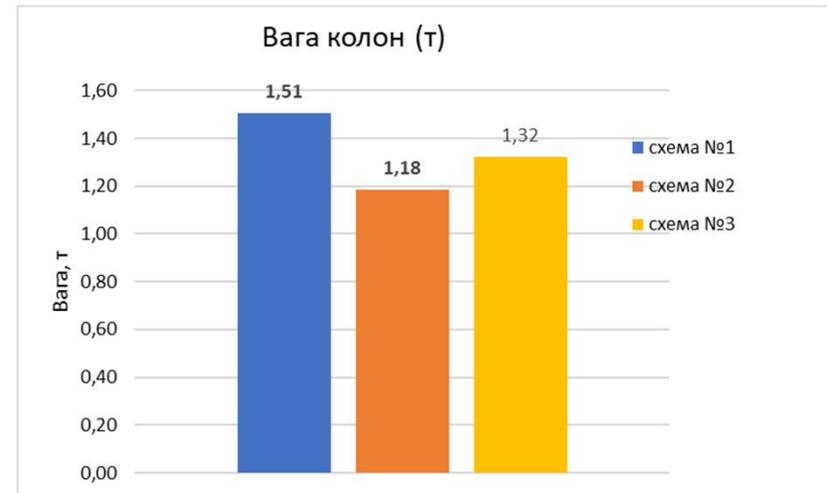
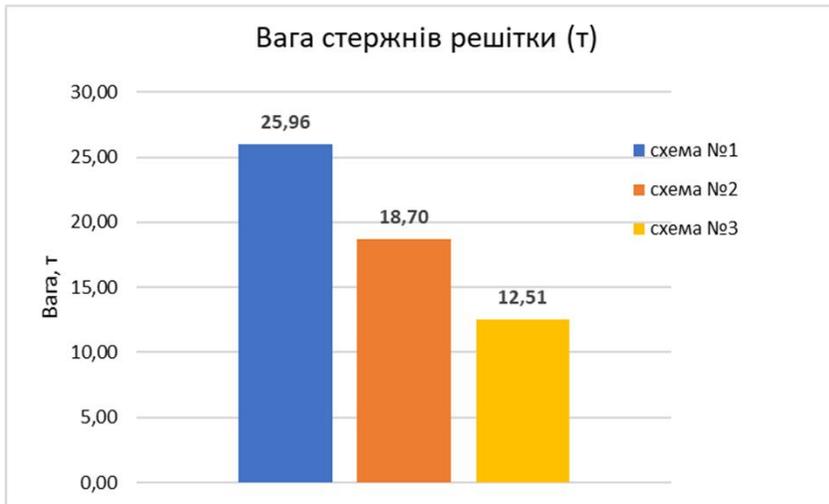
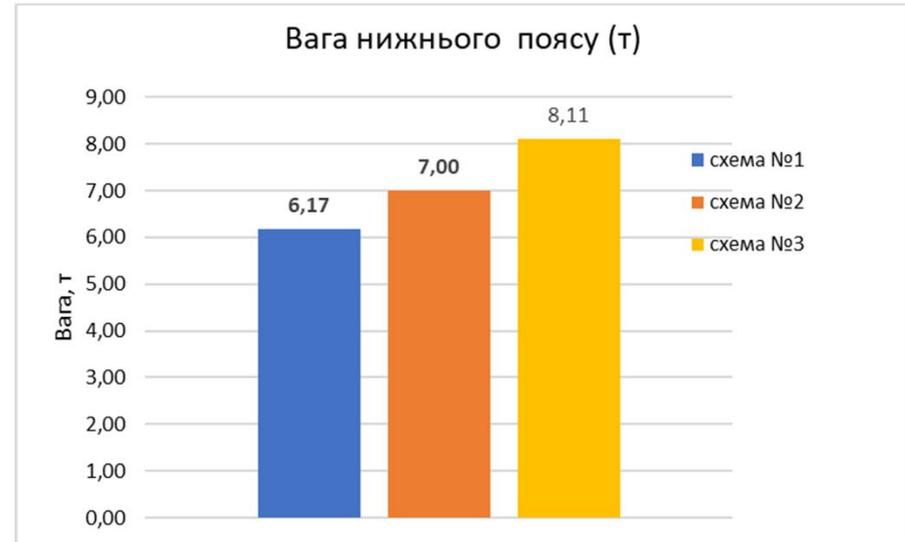
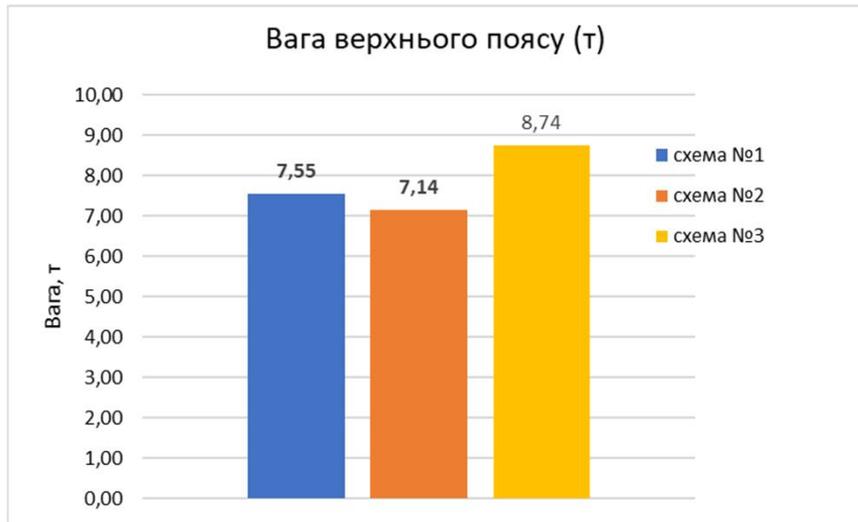
Таблиця - Підбір елементів **колон** після ітераційного розрахунку №1 (ДСТУ 8938:2019)

| № схеми | № типу перерізу | Сталь | Профіль труби | Вага 1м.п. профілю, т | Довжина стержнів поясу, м | Вага, т |
|---------|-----------------|-------|---------------|-----------------------|---------------------------|---------|
| 1 | 1 | C235 | ТБ 273*8 | 0,0522611 | 28,8 | 1,51 |
| 2 | 1 | C235 | ТБ 245*7 | 0,041069 | 28,8 | 1,18 |
| 3 | 1 | C235 | ТБ 273*7 | 0,045901 | 28,8 | 1,32 |

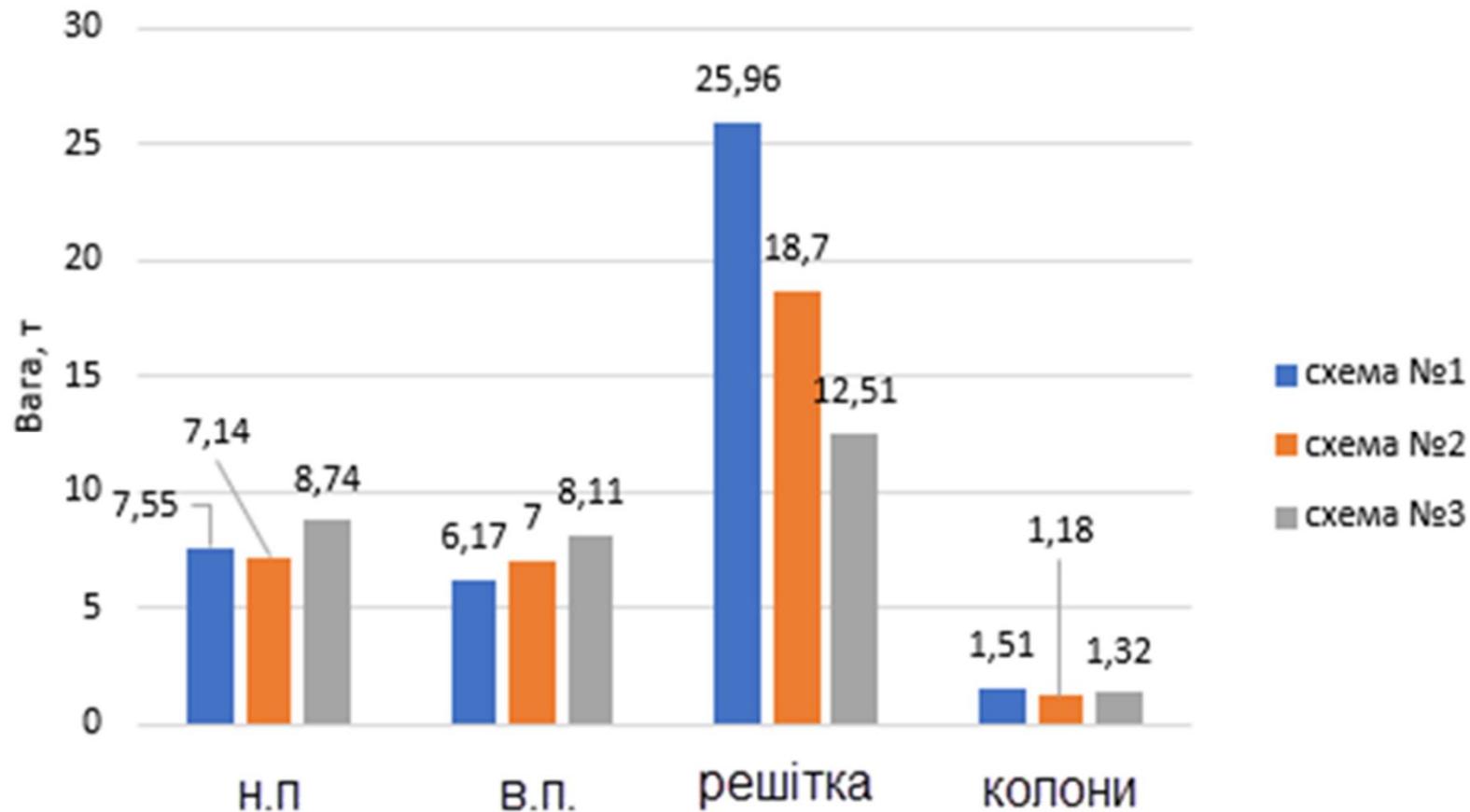
Підрахунок ваги моделей

| Назва групи конструктивних елементів | Модель №1 | Модель №2 | Модель №2 |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Верхній пояс | 7,55 | 7,14 | 8,74 |
| Нижній пояс | 6,17 | 7,00 | 8,11 |
| Розкоси | 25,96 | 18,7 | 12,51 |
| Вага структурної плити без врахування ваги колон: | | | |
| Колони | 1,51 | 1,18 | 1,32 |
| Всього: | 41,19 | 34,02 | 30,68 |

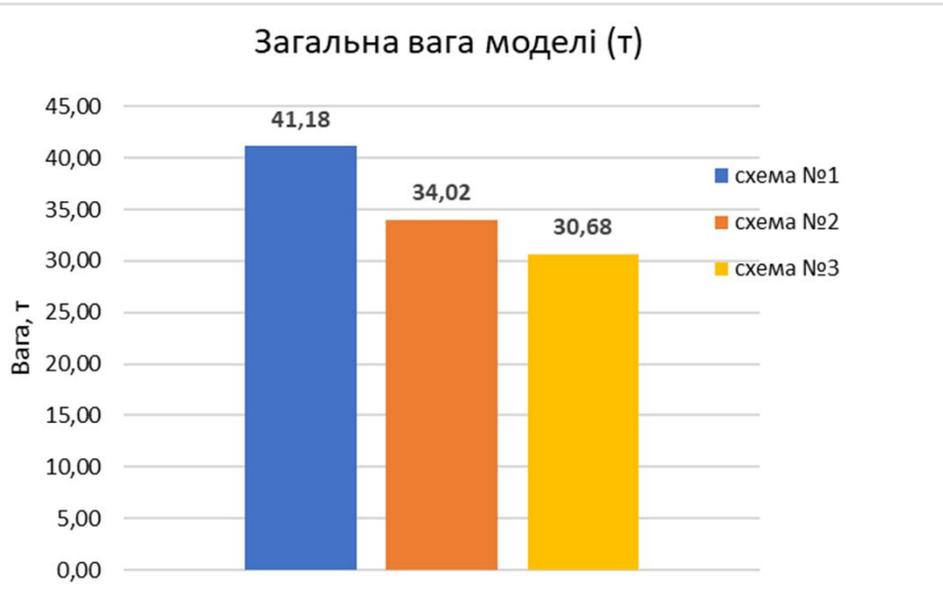
Підрахунок ваги моделей



Підрахунок ваги конструктивних груп стержнів



ВИСНОВКИ



1. Структурну плиту покриття можна охарактеризувати як ефективну раціональну конструкцію покриття, що дозволяє перекривати значні прольоти без улаштування додаткових опор. Також такій конструкції притаманні висока жорсткість, технологічних (наявність уніфікованих елементів).

2. Зміна геометричних параметрів конструкції плити значним чином впливає на напружено-деформований стан стержнів плити. Так форма базового (одиночного) елемента, що мультиплікується, значним чином впливає на напружено-деформований стан при збереженні решти параметрів та умов.

3. Серед розглянутих трьох моделей плит, що відрізняються одна від одної лише одним параметром формою базового елемента була визначена найбільш ефективна конструкція за параметром статичної роботи та за критерієм матеріалоемності.

ВИСНОВКИ

4. Підбір перерізів для конструктивних груп стержнів конструкції показав наступні результати. Так, підбір елементів верхнього поясу моделей, що досліджуються, після ітераційного розрахунку №1 показав, що найбільшу вагу має верхній пояс моделі №3 (на 15,8% та 22,4% він є важчим, ніж у моделей №1 та №2 відповідно).

5. Підбір перерізів для конструктивних груп стержнів конструкції показав наступні результати. Так, підбір елементів нижнього поясу моделей, що досліджуються, після ітераційного розрахунку №1 показав, що найбільшу вагу має верхній пояс моделі №3 (на 7,4 % та 13,6% він є важчим, ніж у моделей №1 та №2 відповідно).

6. Але вага елементів решітки для моделі №3 в порівнянні із моделями №1 та 2 , є найменшою, що і обумовлює в решті -решт загальну вагу моделі №3, яка виявилася найменшою в порівнянні із моделями №1 та №2 (на 107,5% та 38,8% відповідно).

ВИСНОВКИ

7. Вага колон моделей є величиною майже одного порядку та є найменшою для моделі №2

8. Аналізуючи сумарну вагу всіх елементів моделі робимо висновок, що модель із формою кристалу 3-го типу є найлегшою в порівнянні із вагою моделі №1 та №2 відповідно (на 34,2% в порівнянні із моделлю №1 та на 21% в порівнянні із моделлю №2).

Отже, керуючись лише одним зміним критерієм-формою базового елемента при інших незмінних параметрах, слід зробити висновок, що такий критерій може суттєво вплинути як на НДС системи так і на матеріалоемність варіанту плити, що досліджується.