

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

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
Будівельних конструкцій

/...../

підпис

«__» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження роботи структурної оболонки»

Виконав (ла)

(підпис)

Бурик В.В.

(Прізвище, ініціали)

Група

(Науковий)

керівник

(підпис)

Срібняк Н.М.

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: будівельних конструкцій

Спеціальність: 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Бурик Володимир Володимирович

Тема роботи: Дослідження роботи структурної оболонки

Затверджено наказом по університету № 40/ос від "07" 01 2025р.
Строк здачі студентом закінченої роботи: "___" _____ 2025 р.

Вихідні дані до роботи:

Дослідити, як впливає кількість колон та спосіб їх розташування на напружено-деформований стан, конструктивне рішення та матеріалоемність стержньової просторової конструкції покриття.

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

Виконати огляд джерел щодо конструктивних рішень структурних плит, способів їх обпирання, дати опис статичній роботі систем за різних способах їх обпирання. Оцінити НДС декількох конструкцій за різних способах обпирання, зробити конструктивний підбор та оцінити матеріалоємність кожної моделі.

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)

Н.М. Срібняк

(Прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання:

Здобувач

(підпис)

В.В. Бурик

(Прізвище, ініціали)

Анотація

Бурик Володимир Володимирович. Дослідження роботи структурної оболонки – Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

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

Робота включає зміст, загальну характеристику та кваліфікаційні ознаки, огляд досліджень за обраною темою, розділи основної частини, підсумкові висновки за результатами дослідження, а також формулювання висновків українською й англійською мовами.

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

Результати досліджень дозволяють отримати комплексні результати, які відображають особливості роботи структурних стрижневих просторових плит та ефективність різних їх конструктивних рішень. Зокрема, результати магістерської роботи дозволяють:

1. Сформувати повне уявлення про конструктивну природу просторових стрижневих плит, їх типи, принципи роботи та відмінності між варіантами виконання.
2. Встановити ключові чинники, що впливають на напружено-деформований стан, а також визначити, як ці фактори проявляються в реальних умовах навантаження та закріплення.
3. Порівняти поведінку різних варіантів конструкцій, створених у ПК Ліра-САПР, завдяки ідентичним умовам моделювання та відмінностям лише в розташуванні й кількості опорних стійок.

4. Отримати дані статичного та конструктивного розрахунку, що дає змогу оцінити працездатність кожної моделі та перевірити її відповідність нормам проєктування.
5. Проаналізувати внутрішні зусилля, деформації, переміщення та стійкість конструкцій, що дозволяє визначити найбільш напружені елементи та оцінити рівень надійності кожного варіанту.
6. Оцінити ступінь використання перерізів стрижневих елементів, визначити їх достатність або необхідність коригування відповідно до жорсткісних характеристик.
7. Підібрати оптимальні перерізи елементів конструкцій у модулі «Метал» Ліра-САПР 2024 згідно з вимогами чинних норм.
8. Порівняти вагу всіх конструктивних варіантів та визначити найекономічніший, тобто той, що потребує мінімального об'єму матеріалу при забезпеченні необхідної міцності та стійкості.

Аналіз публікацій та досліджень встановив, що структурні стрижневі покриття є легкими, жорсткими та ефективними системами для великопрольотних будівель, завдяки універсальним трубчастим елементам і можливостям сучасного комп'ютерного розрахунку. Їхня ефективність визначається конструктивною схемою, типом сітки та способом обпирання. Найраціональнішими є плити з квадратною або трикутною сіткою, що спираються на мінімальну кількість вузлів та передають навантаження через несучі й в'язеві елементи. Орієнтація сітки та схема опирання суттєво впливають на зусилля та прогини, а багатоточкове спирання забезпечує легші та надійніші конструкції.

В **основній частині** наведено порівняння трьох просторових моделей структурних плит, що різняться лише конфігурацією опорної системи. Колони в цих схемах розміщено по-різному: тільки у кутових вузлах; уздовж двох протилежних довгих граней; або безперервно по всьому периметру прямокутної

плити розміром 36×24 м. Фактично варіація схеми опирання виступає керівним параметром, який визначає характер перерозподілу внутрішніх зусиль та деформацій у плиті. Саме порівняння цих варіантів дає змогу встановити, яка конструктивна модель забезпечує найкращу статичну роботу і водночас потребує мінімального обсягу матеріалу, тобто є найбільш економічною й легкою.

У **висновках** встановлено, що стрижнева просторова плита ефективно перекидає великі прольоти та дуже чутлива до зміни конструктивних параметрів. Зміна схеми опирання істотно впливає на розподіл зусиль, жорсткість і деформативність. Зі збільшенням кількості опор напруження та прогини різко зменшуються, а стійкість зростає. Найгірше працює схема з чотирма опорами, помірно — схема з опорами вздовж двох сторін, і найкраще — плита, оперта по периметру. Вона є найжорсткішою, найдешевшою та найменш матеріаломісткою, тому є оптимальним конструктивним рішенням.

Ключові слова: осьові зусилля в елементах; структурна плита перекриття; регулятори зусиль у конструкції; спосіб розташування колон; матеріаломісткість несучих елементів; критерій конструктивної ефективності

Список публікацій та/або виступів на конференціях студента:

Бурик В.В. Аналіз напружено-деформованого стану стержньових оболонок. // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.

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

Структура роботи. Робота складається з основного тексту на 55 сторінках, у тому числі 15 таблиць, 50 рисунків. Текст роботи містить 6 розділів, що включають загальну характеристику роботи й висновки, список з 27 джерел, 2 додатків на 39 сторінках. Графічна частина складається з 35 слайдів мультимедійної презентації.

Annotation

Buryk Volodymyr Volodymyrovych. *Investigation of the Structural Shell Performance* – Master’s Qualification Thesis, manuscript.

Master’s qualification thesis in specialty 192 “Construction and Civil Engineering”. – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The thesis **includes** a table of contents, general characteristics and qualification features, a review of research on the chosen topic, sections of the main part, final conclusions based on the research results, as well as conclusions formulated in Ukrainian and English.

The **purpose, objectives, research object and subject, and scientific research methods** are defined.

The **research results provide** comprehensive findings that reflect the specific behavior of structural spatial bar slabs and the efficiency of their various structural solutions. In particular, the results of the master’s thesis allow to:

1. Form a complete understanding of the structural nature of spatial bar slabs, their types, operating principles, and differences between design alternatives.
2. Identify key factors influencing the stress–strain state and determine how these factors manifest under real loading and support conditions.
3. Compare the behavior of different structural options created in Lira-SAPR through identical modeling conditions and differences only in the arrangement and number of support columns.
4. Obtain data from static and structural analysis, enabling an assessment of each model’s performance and compliance with design standards.
5. Analyze internal forces, deformations, displacements, and stability of the structures, which allows identifying the most stressed elements and assessing the reliability level of each option.

6. Evaluate the degree of utilization of the bar elements' cross-sections, determining their adequacy or the need for adjustments according to stiffness characteristics.
7. Select optimal cross-sections for the structural elements using the “Metal” module of Lira-SAPR 2024 in accordance with current regulatory requirements.
8. Compare the weight of all structural options and determine the most economical one — that is, the option requiring the minimum material volume while ensuring the necessary strength and stability.

The **analysis of publications** and studies revealed that structural bar roofs are lightweight, stiff, and efficient systems for long-span buildings due to universal tubular elements and the possibilities of modern computer-based analysis. Their efficiency is determined by the structural scheme, grid type, and support configuration. The most rational systems are slabs with square or triangular grids supported at a minimal number of nodes and transferring loads through bearing and bracing members. The grid orientation and support scheme significantly influence forces and deflections, while multi-point supports provide lighter and more reliable structures.

The **main part** presents a comparison of three spatial models of structural slabs differing solely in the configuration of the support system. The columns in these schemes are arranged differently: only at the corner nodes; along two opposite long edges; or continuously along the entire perimeter of a 36×24 m rectangular slab. In fact, the variation of the support scheme serves as a governing parameter determining the pattern of internal force redistribution and deformation within the slab. The comparison of these options makes it possible to establish which structural model ensures the best static performance while requiring the least amount of material — i.e., which is the most economical and lightweight.

The **conclusions** state that the spatial bar slab efficiently spans large distances and is highly sensitive to changes in structural parameters. A change in the support scheme significantly affects the distribution of forces, stiffness, and deformability. As

the number of supports increases, stresses and deflections decrease sharply while stability increases. The worst-performing scheme is the one with four supports, the moderate one is with supports along two sides, and the best-performing is the slab supported along the entire perimeter. It is the stiffest, most economical, and least material-intensive, therefore representing the optimal structural solution.

Keywords: axial forces in members; structural slab; force regulators in the structure; column arrangement method; material consumption of load-bearing elements; criterion of structural efficiency

List of publications and/or conference presentations of the student:
Buryk V.V. Analysis of the stress–strain state of bar shells. // Proceedings of the All-Ukrainian Scientific Conference of Students and Postgraduates dedicated to the International Students’ Day (17–21 November 2025). – Sumy, 2025.

The appendices include: conference abstract, multimedia presentation slide deck.

Structure of the thesis. The thesis consists of 55 pages of main text, including 15 tables and 50 figures. The text contains 6 chapters, including general characteristics and conclusions, a list of 27 references, and 2 appendices totaling 39 pages. The graphic part consists of 35 multimedia presentation slides.

ЗМІСТ

Завдання		
Анотація		
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ		
1.1 Актуальність теми	12	
1.2 Мета, задачі, предмет та об’єкт дослідження	12	
РОЗДІЛ 2. БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ		13
2.1 Загальні відомості щодо структурних покриттів	13	
2.2 Способи спирання плит на опори	16	
2.3 Схеми обпирання просторових стержньових конструкцій	16	
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ		20
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ СТРУКТУРНИХ ПОКРИТТІВ, ЩО ДОСЛІДЖУЮТЬСЯ		21
4.1 Геометрія моделей покриття	21	
4.2 Регулятори зусиль	24	
4.3 Матеріали для структури	29	
4.4 Характеристики жорсткостей скінчених елементів	29	
4.5 Граничні умови	30	
4.6 Навантаження на структуру	31	
РОЗДІЛ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНОГО ПОКРИТТЯ		34
5.1 Зусилля в стержнях структури	34	
5.2 Аналіз напруженого стану	42	
5.3 Деформативність моделей плит, що досліджуються	45	
5.4 Стійкість моделей	50	
5.5 Оцінка використання несучої здатності перерізів стержнів із жорсткостями, прийнятими у вихідних даних	53	
5.6 Висновки щодо використання несучої здатності перерізів стержнів із жорсткостями, прийнятими у вихідних даних	56	

5.7 Підбір нових перерізів стержньових елементів в модулі «Метал»	
ПК Ліра-САПР.....	58
РОЗДІЛ.6 ВИСНОВКИ.....	64
Література.....	67
Додатки.....	70
Додаток 1. Тези доповіді на конференції	
Додаток 2. Графічний матеріал (презентація)	

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

1.1 Актуальність теми

Структурні великопрольотні плити покриття є універсальними, ефективними та формуються повторенням базового елемента-кристалу, що надає їм кристалічну будову, подібну до графіту чи алмазу. Такі плити можуть бути плоскими або криволінійними (сферичними, циліндричними, гіперболічними). Для їх виготовлення застосовують сталь, алюміній або деревину, а в Україні найчастіше використовують армоцементні елементи регулярної структури.

1.2 Мета, задачі, предмет та об'єкт дослідження

Основна **ціль** дослідження — знайти такий варіант структурної металевої плити, який потребує найменшої витрати матеріалу. Усі рішення, що порівнюються, відрізняються між собою тільки кількістю колон і схемою їх розташування відносно прямокутної в плані плити.

Щоб досягти поставленої мети, необхідно виконати такі **задачі**:

1. Вивчити основи формування структурної стрижневої просторової плити, розглянути особливості роботи різних її типів та порівняти їх між собою.
2. Визначити й проаналізувати чинники, що впливають на напружено-деформований стан таких конструкцій.
3. Створити в ПК Ліра-САПР скінченоелементні моделі плит однакових розмірів, геометрії, граничних умов та навантажень, які відрізняються лише кількістю та розташуванням опорних стійок.
4. Провести статичний і конструктивний розрахунок трьох варіантів плит в ПК Ліра-САПР.
5. Оцінити напружено-деформований стан цих моделей, включно з внутрішніми зусиллями, переміщеннями вузлів та загальною стійкістю.

6. Оцінити ступінь використання перерізів стержнів за жорсткостями, що призначені у вихідних даних.
7. Виконати підбір нових перерізів у модулі «Метал» Ліра-САПР 2024 для кожної схеми згідно вимог норм проектування [9].
8. Визначити вагу всіх конструктивних варіантів й вибрати той, який потребує найменшого об'єму матеріалу.

Об'єкт дослідження – структурні просторові стержньові плити покриття розміром в плані 36,0 x24,0 м, які мають різну кількість опор та різну їх локалізацію при незмінності інших геометричних параметрів та фізико-механічних характеристик матеріалу.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан, конструктивне вирішення, матеріалоемність трьох конструктивних схем стержньових просторових плит.

Практичне значення отриманих результатів

Отримані результати дозволяють, спираючись на статичний розрахунок, визначити нові жорсткості стержнів конструкції — підібрати інші перерізи та розрахувати вагу кожної з розглянутих моделей.

Апробація та публікація результатів роботи

Підсумки дослідження оприлюднено в збірнику тез щорічної студентсько-викладацької конференції СНАУ (17–21 листопада 2025 р.).

Бурик В.В. Аналіз напружено-деформованого стану стержньових оболонок. // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.

РОЗДІЛ 2

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Загальні відомості щодо структурних покриттів

У світовій практиці зведено багато унікальних будівель, у яких несучі конструкції підбирають індивідуально. Широко використовуються металеві

структурні ґратчасті системи покриття, що поєднують виразну архітектуру та ефективні конструктивні рішення. Особливо поширені трубчасті профілі, оптимальні для сприйняття осьових зусиль.

Структурні плити — це просторові стрижневі системи, подібні до кристалічних ґраток, які вирізняються універсальністю, малою вагою, зручністю виготовлення та транспортування. Вони застосовуються для великопрольотних покриттів, а їхня ефективність залежить від конструктивних параметрів, тому пошук оптимальної схеми є важливим етапом проектування.

Структурні конструкції, що дають змогу створювати легкі й жорсткі покриття складних форм, широко застосовуються завдяки новим матеріалам і можливостям комп'ютерного розрахунку. Вони походять від перехресних ферм, але зведені до мінімальної кількості типових елементів — вузлів і стержнів.

Основні переваги структурних покриттів: свобода формоутворення, універсальність у поєднанні з іншими системами, архітектурна виразність, простота монтажу, можливість перекривати прольоти понад 100 м, уніфікація елементів та економне використання металу.

Стрижневі плити поділяють на три групи — з квадратною, трикутною або змішаною сіткою. Вибір залежить від форми будівлі: для прямокутних схем — плити I групи, для криволінійних — II і III.

Структурні покриття можуть транспортуватися у вигляді окремих стержнів і вузлів, ферм або просторових модулів. Проблемами проектування є складність формоутворення, недостатня вивченість роботи систем, недосконалі вузлові рішення та відсутність універсальних методик розрахунку.

Вузли структурних систем поділяють на зварні, болтові та комбіновані. Найпоширеніша система — MERO: трубчасті стержні кріпляться до сталевих куль із різьбовими отворами. Під час експлуатації такі вузли сприймають

значні осьові зусилля, однак можуть бути вразливими до згинальних напружень у зоні різьби.

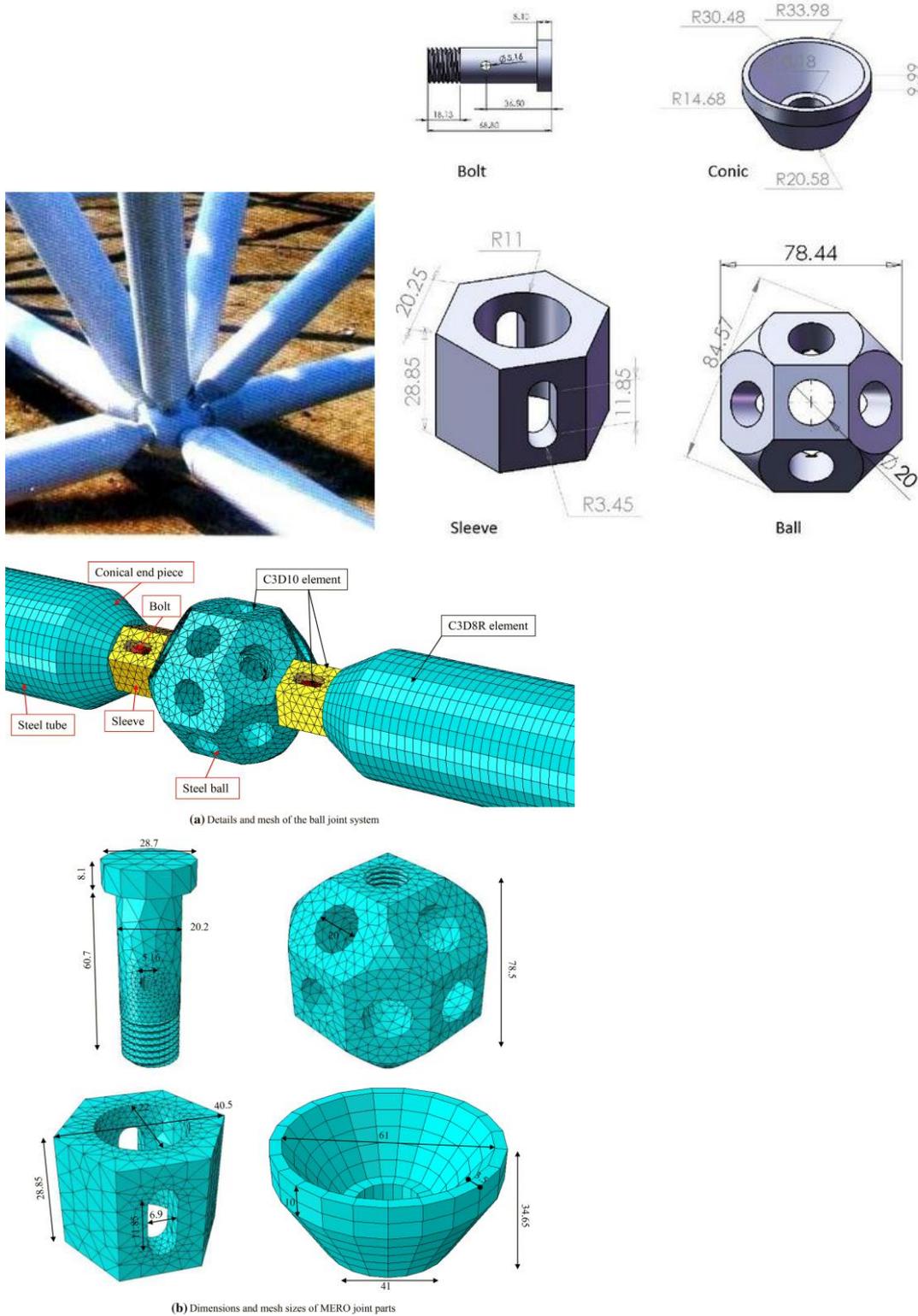


Рис.2.1 Вузол з'єднання системи «MERO»

2.2 Способи спирання плит на опори

Залежно від стрижневої схеми покриття можливі чотири варіанти передачі навантаження: обпирання плит на пояси конструкції (для малих і довгих плит), обпирання малорозмірних плит безпосередньо на вузли, а також спирання плит через прогони, що передають зусилля у вузли структурної системи [5].

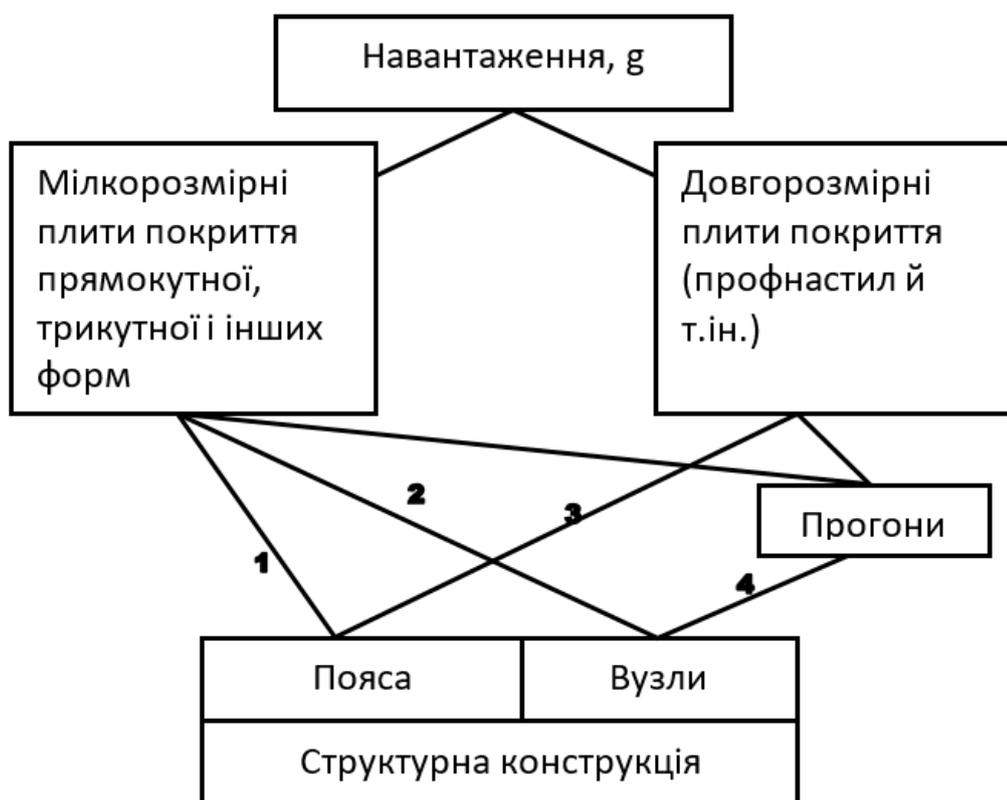


Рис. 2.2 Схеми передачі навантаження на структурну конструкцію [5]

Раціональними є схеми 1, 3 і 4, тоді як схема 2 є неефективною через потребу в спеціальних плитах із ребрами. Вона підходить лише тоді, коли плити одночасно виконують несучі й огорожувальні функції. Найекономічнішими є системи, де плити покриття та прогони поєднують несучу й в'язеву роботу [5].

2.3 Схеми обпирання просторових стержньових конструкцій

Структурні конструкції можуть спиратися за статично визначуваними або невизначуваними схемами. Для квадратної сітки необхідно опиратися на

чотири вузли, для трикутної — на три, інакше система стає статично невизначуваною [5].

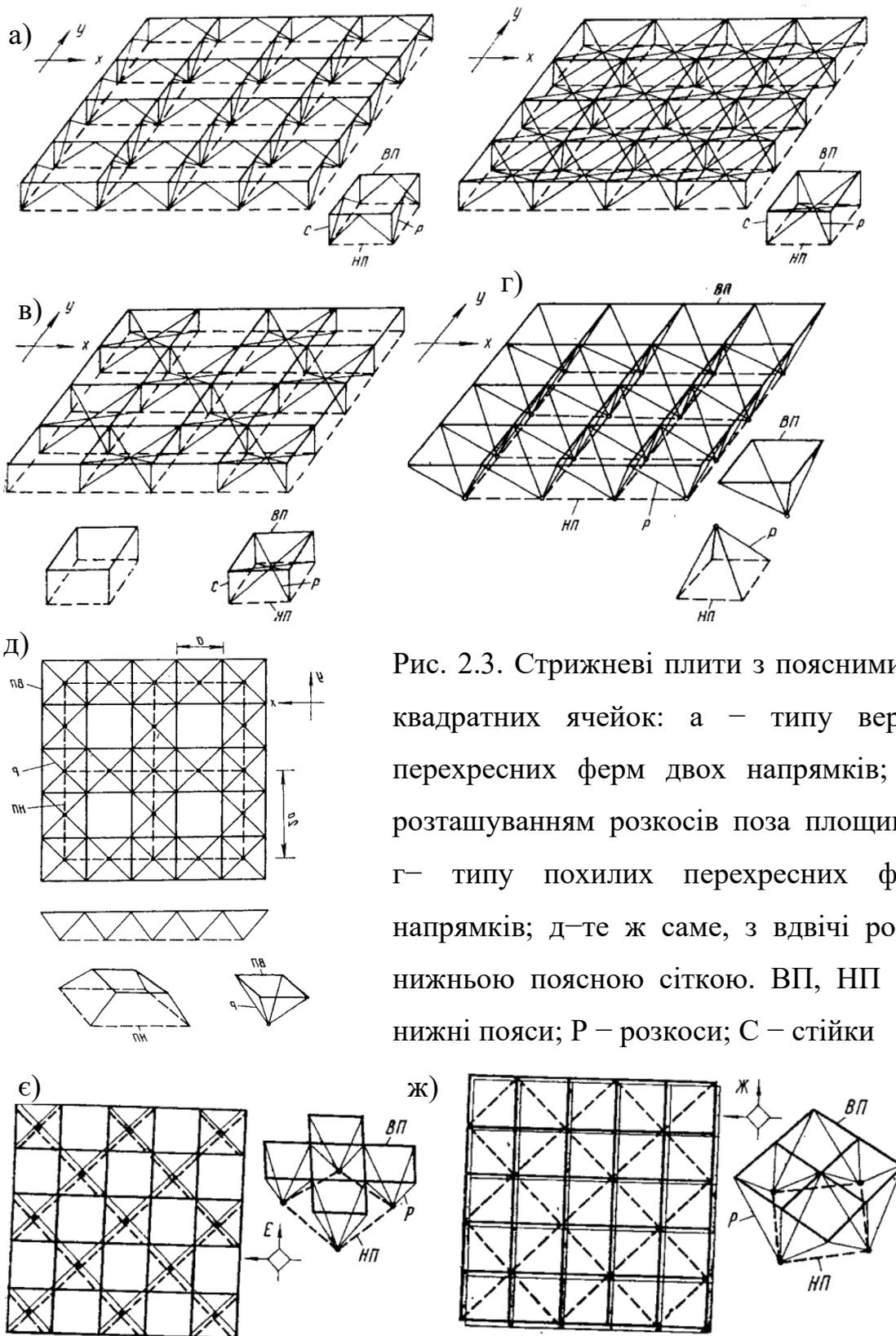


Рис. 2.3. Стрижневі плити з поясними сітками з квадратних ячеек: а — типу вертикальних перехресних ферм двох напрямків; б, в — з розташуванням розкосів поза площиною ферм, г — типу похилих перехресних ферм двох напрямків; д — те ж саме, з вдвічі розрідженою нижньою поясною сіткою. ВП, НП — верхні і нижні пояси; Р — розкоси; С — стійки

Рис. 2.4 Стрижневі плити з поверненими відносно один одного на 45° поясними сітками з квадратних комірок: е - вузли нижньої сітки розташовані

в шаховому порядку під центрами комірок верхньої сітки; вузли сіток з'єднані розкосами; ж - вузли нижньої сітки розташовані в шаховому порядку під кутами верхньої поясної сітки

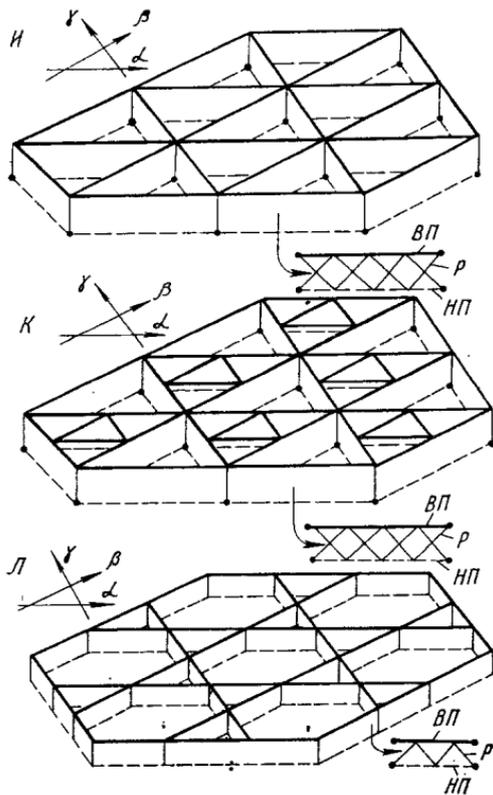


Рис. 2.5 Стрижньові плити, утворені перетинанням вертикальних ферм трьох напрямків: И - з поясними сітками з трикутних комірок; К - з шаховим розташуванням зв'язків в комірках верхньої поясної сітки; Л - з утворенням поясних сіток з поєднання трикутних і шестикутних комірок [5].

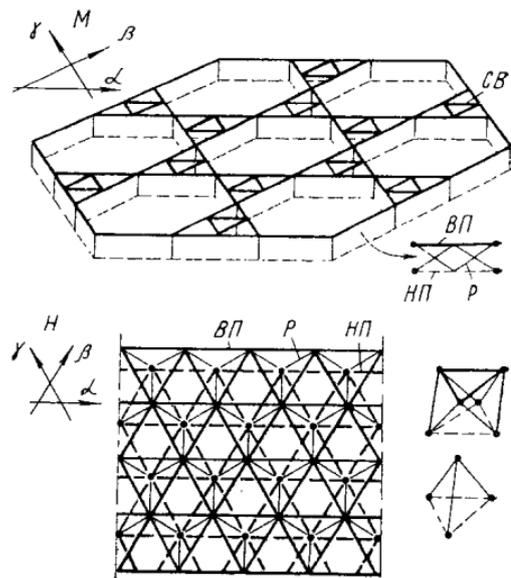


Рис. 2.6 Стрижньові плити, утворені перетинанням вертикальних «М» і похилих «Н» ферм трьох напрямків: М - з утворенням поясних сіток з поєднання трикутних і шестикутних комірок зі зв'язками в трикутних комірках верхньої поясної сітки; Н - з поясними сітками з трикутних комірок

Діагональна орієнтація структур з квадратною сіткою знижує зусилля в поясах на 27% і зменшує прогин у 4 рази порівняно з паралельною орієнтацією. Найпоширеніші в промислових будівлях – стрижневі плити з квадратних ячеек із статично визначними умовами обпирання.

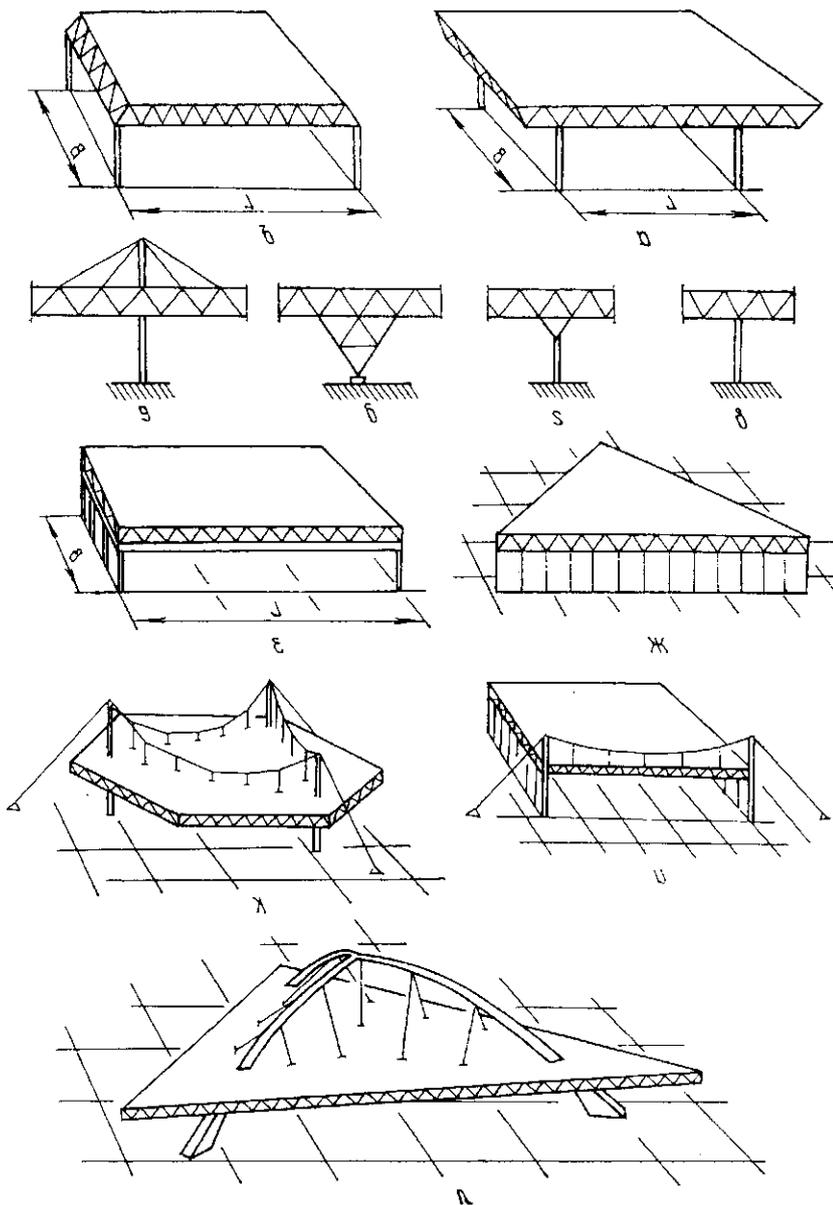


Рис. 2.7. Обпирання стержньових структурних плит

Структурні покриття можуть спиратися на одну або кілька колон, включно з капітелями чи V-подібними елементами. Для громадських і спортивних будівель середніх та великих прольотів оптимальне обпирання – по периметру, а багатоточкове спирання робить конструкції легшими. Іноді потрібні додаткові колони для підсилення при великих навантаженнях або аварійних станах [22].

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для досягнення мети роботи та визначення оптимального варіанту структурної металевої плити з мінімальною витратою матеріалу застосовано комплекс методів дослідження.

По-перше, виконано **скінченоелементне моделювання** у ПК Ліра-САПР. Було створено моделі трьох плит однакових розмірів, геометрії, матеріалу та граничних умов, що відрізняються лише кількістю та розташуванням колон. Це дозволило дослідити напружено-деформований стан конструкцій, внутрішні зусилля в стержнях, переміщення вузлів та загальну стійкість.

По-друге, проведено **статичний розрахунок** плит під дією нормативних навантажень. Аналіз включав визначення максимальних осьових і згинальних зусиль, прогинів та моментів, що забезпечило оцінку ефективності різних схем опор та роботи конструкційних елементів.

По-третє, для підвищення економічності використано **оптимізаційний підбір перерізів стержнів** у модулі «Метал» Ліра-САПР 2024. Це дозволило визначити оптимальні розміри елементів кожної схеми плити без зниження жорсткості та стійкості.

Нарешті, проведено **порівняльний аналіз** матеріалоемності та конструктивних характеристик. Оцінювалися вага плит, ступінь використання перерізів та рівномірність роботи стержнів, що дозволило визначити найбільш ефективну конструктивну схему з мінімальними витратами матеріалу.

Завдяки комплексному застосуванню цих методів дослідження досягнуто всебічної оцінки роботи плит та обґрунтовано вибір оптимального варіанту конструкції.

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ СТРУКТУРНИХ ПОКРИТТІВ, ЩО ДОСЛІДЖУЮТЬСЯ

У роботі постає задача оптимізувати напружено-деформований стан конструкції шляхом зміни певних параметрів, щоб отримати варіант плити з мінімальною вагою. Мінімізація ваги є одним із найпоширеніших критеріїв проєктування [16,17,18]. Для цього застосовано метод числового експерименту [19]. Регулювання НДС конструкції розглядається як елемент керування її роботою — окремий напрям у будівельній механіці [20]. Як змінні параметри обрано три схеми розташування колон: у чотирьох кутах, уздовж довгих сторін плити та по всьому периметру конструкції.

4.1 Геометрія моделей покриття

У літературі [5] зазначено, що для практичного проєктування структурних плит перекриттів відомо 20 основних типів стрижневих систем. Серед них окремо виділяють конструкцію на основі похилих перехресних ферм у двох напрямках [6].

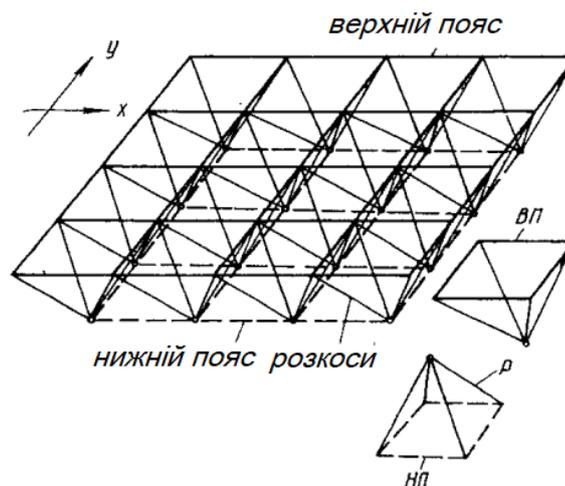


Рис. 4.1 Дворядна система нахилених перехресних ферм, яку використовують для моделювання структурної плити

Опорна схема структурних покриттів може формуватися по-різному, що визначає їх зовнішню статичну визначуваність або невизначуваність. Для систем із квадратною поясною сіткою (рис. 4.1) конструкція вважається зовні статично визначуваною за наявності чотирьох опорних вузлів; збільшення числа опор до п'яти і більше робить систему зовні статично невизначуваною. Водночас під час розрахунку методом скінченних елементів цей критерій не є ключовим.

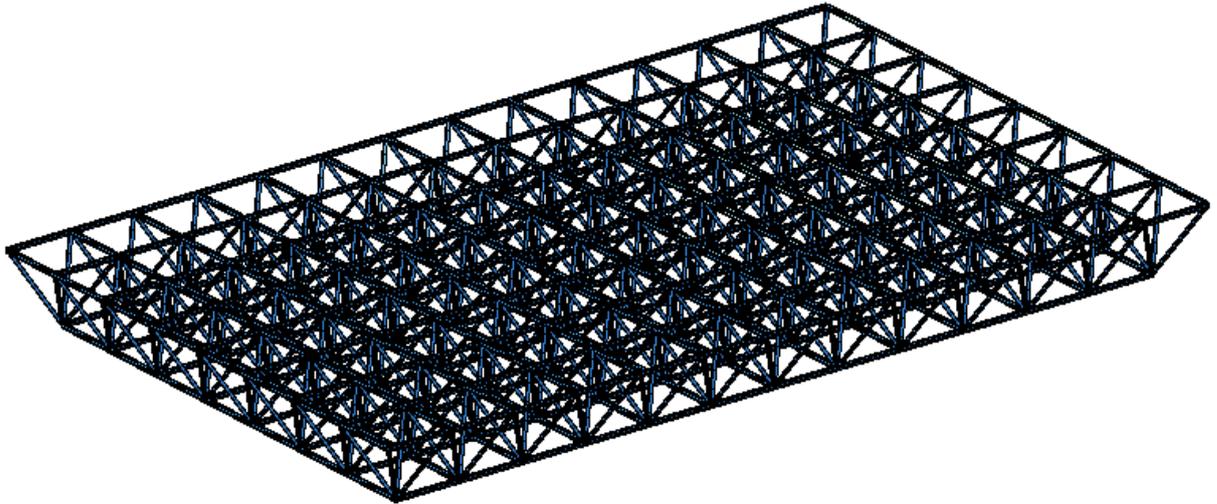
Структурні плити з розміром комірки 2–4 м дають змогу відмовитись від прогонів, оскільки настил можна кріпити безпосередньо до верхнього поясу. У такому разі настил спільно працює з конструкцією, зменшуючи розрахункові довжини елементів верхнього поясу з площини. При вузловій передачі навантаження стержні працюють лише на розтяг і стиск, тоді як при лінійному кріпленні настилу елементи верхнього поясу зазнають також стиску з вигином [7].

Для просторових систем доцільно застосовувати тонкостінні круглі або квадратні трубчасті перерізи, що дає змогу суттєво знизити вагу порівняно зі структурами з прокатних профілів, хоча вузли їх з'єднання є складнішими [7].

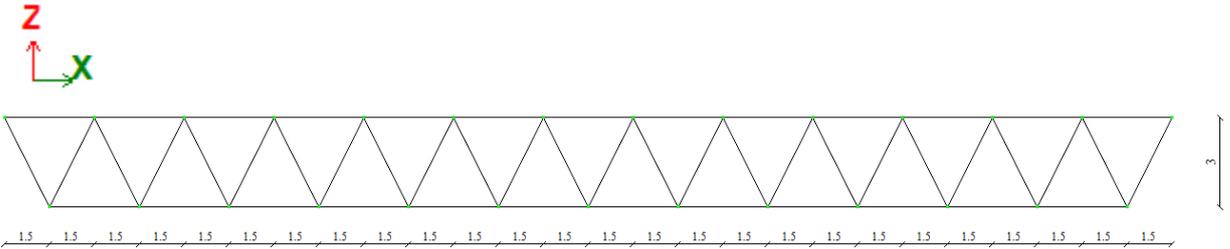
Структурні системи прагнуть виконувати з правильними комірками та елементами однакової довжини – це полегшує виготовлення, транспортування й монтаж, особливо коли конструкції доставляють розсипом або у вигляді укрупнених заводських блоків-«кристалів» [7].

У цьому дослідженні розглядається просторова стрижнева плита розміром $36,0 \times 21,0$ м (рис. 4.2) з ортогональною сіткою поясів $3,0 \times 3,0$ м і висотою конструкції 3,0 м.

a)



б)



в)

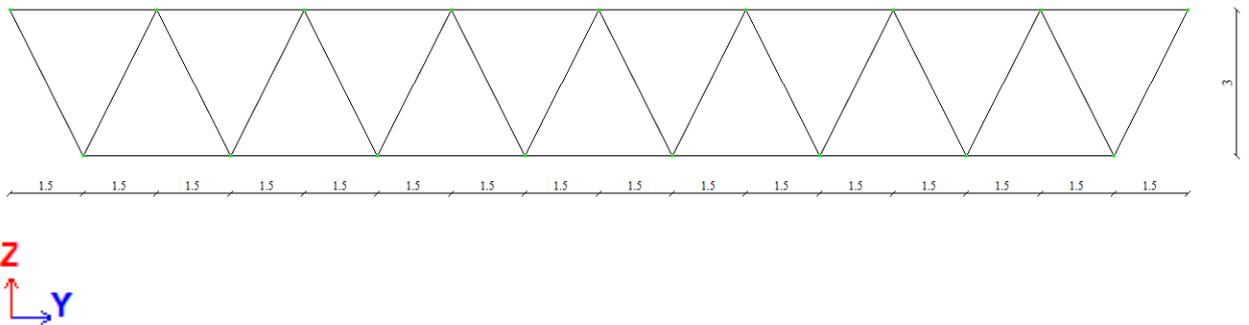


Рис. 4.2 Геометрична схема структурної плити за схемою №1: просторова модель – а; вид зверху (площина XOY) – б; вид з боку (площина XOZ або YOZ)– в

Висота плити становить 1/10 прольоту, що відповідає оптимальному значенню для різних структурних систем [21]. Вузли верхнього та нижнього поясів об'єднані розкосами, а кристали плити мають форму пірамід із квадратною основою. Колони висотою 6,0 м, опирання плити здійснюється на нижній пояс.

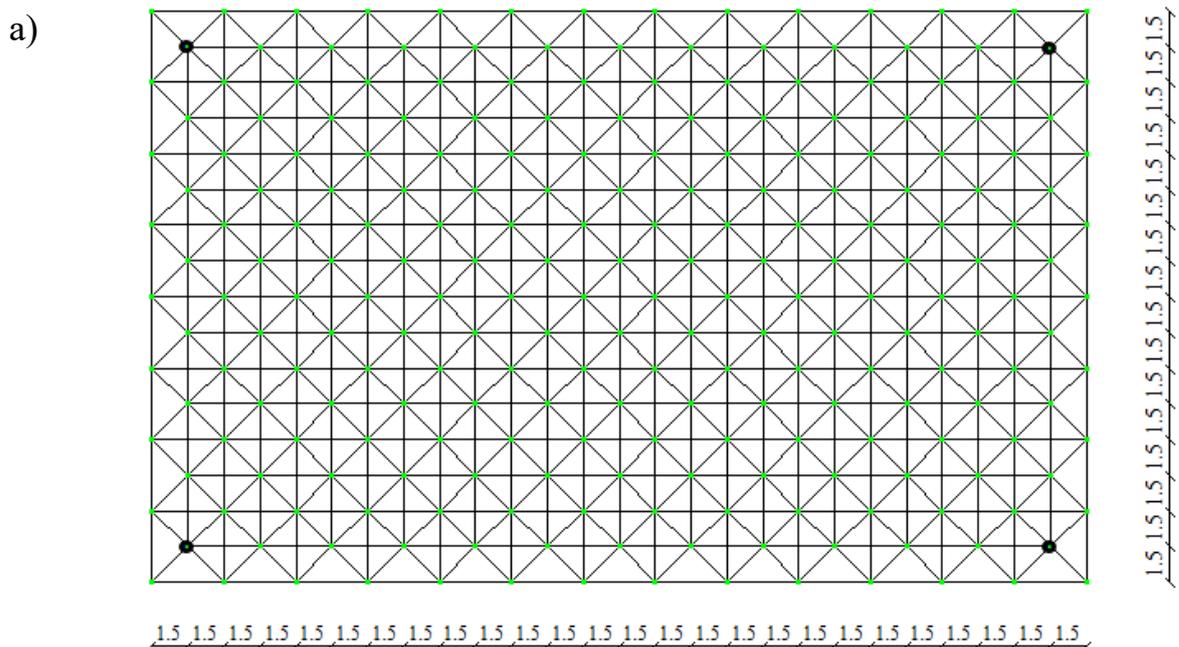
Розміри конструкції, схема навантаження та тип кристала прийняті незмінними. Як обмеження враховано умови міцності для розтягнутих елементів, стійкості — для стиснутих, а також вимоги щодо гнучкості та граничного прогину конструкції [23]. Проміжні опори не передбачені (рис. 4.2), усі з'єднання — шарнірні, а стрижні виконані з електрозварних прямошовних труб за [26].

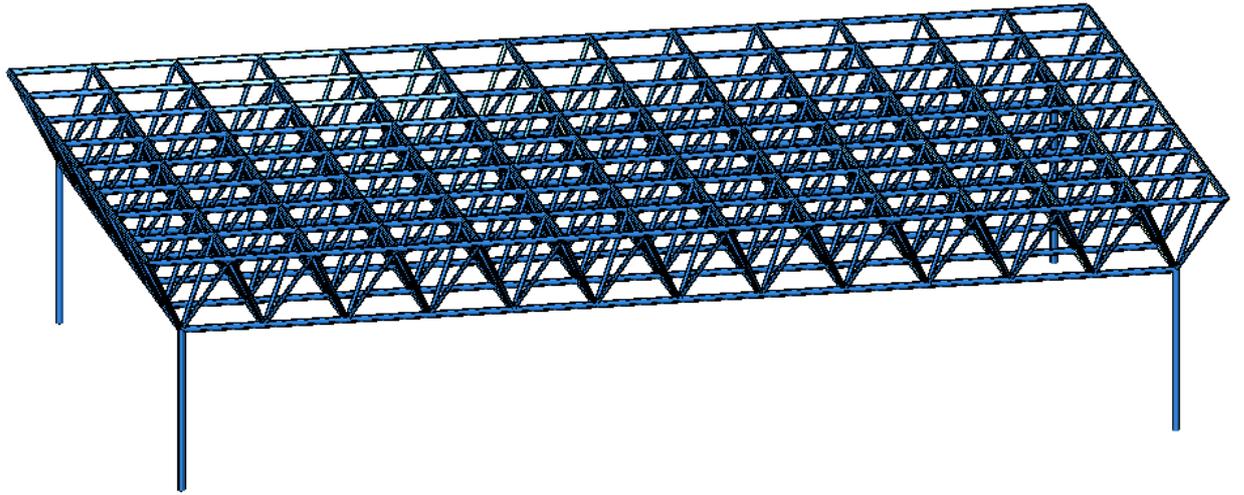
Прямокутна стрижнева система працює у двох напрямках і належить до найефективніших типів структурних плит. Ліхтарі та перепади висот відсутні; двосторонній ухил, зазвичай потрібний для водовідведення, у розрахунках не враховується.

Згідно з даними [8], при співвідношенні сторін 1:0,8 плита фактично починає працювати в одному напрямку, а різниця зусиль уздовж і впоперек прольоту досягає 2,25 рази. Із подальшим зменшенням пропорційності плану нерівномірність розподілу зусиль у взаємно перпендикулярних напрямках лише зростає [7].

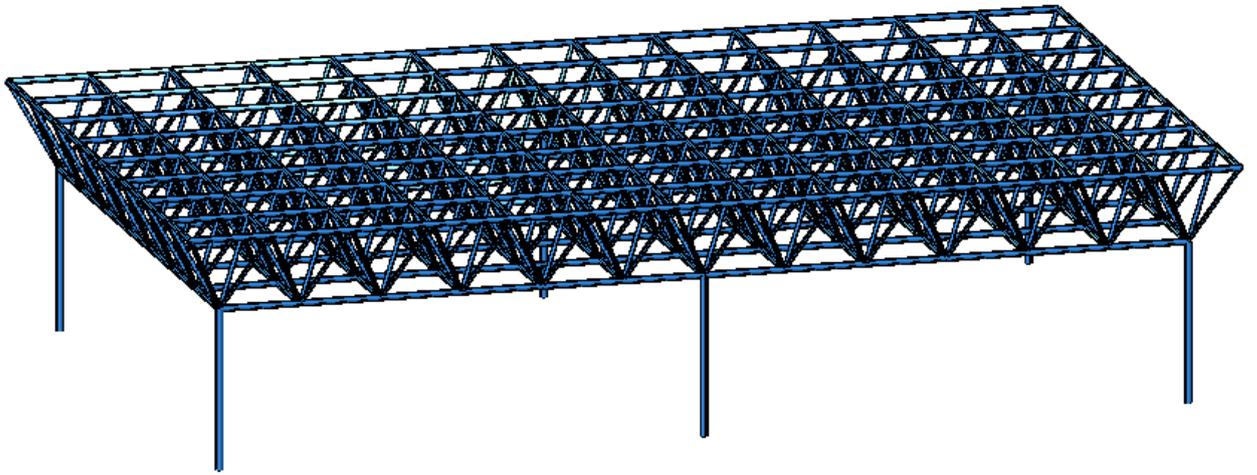
4.2 Регулятори зусиль

За регулятори зусиль в просторових стержнях структури приймемо характер локалізації та кількість колон, на які спирається плита (рис. 4.3).

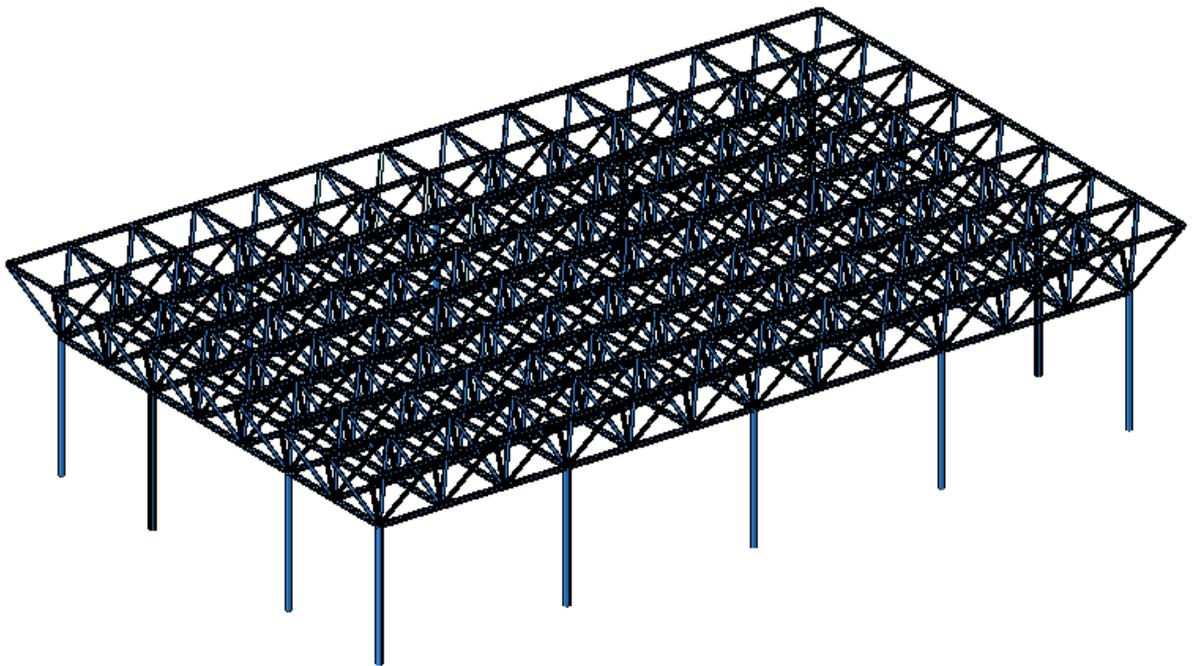




a)



б)



в)

Рис. 4.4 Просторові моделі структурної плити, що досліджуються:

схема №1-а; схема №2-б; схема №3-в

Опис моделей

Модель №1 характеризується тим, що переважає балкова робота по двох напрямках — структура працює як решітчаста двопролітна система з найбільшим прогином у центрі. Прямокутна в плані стержньова просторова плита, оперта на чотири колони, розташовані в кутах, працює як просторова стержнева система з точковим кутовим підпертям, у якій основне навантаження передається через взаємопов'язані стержні шляхом виникнення в них осьових зусиль розтягу та стиску. Обпирання лише у кутах створює максимально розкріплену та геометрично чутливу схему, у якій уся внутрішня частина плити бере участь у багатовекторному перерозподілі зусиль.

За такої схеми опирання плита працює як просторова решітчаста оболонка, у якій відсутні проміжні опори по периметру. Це призводить до формування великої «вільної» прольотної області, що спричиняє домінування мембранних та осьових ефектів у роботі стержнів. У результаті стержні сітки включаються у загальну роботу здебільшого через розтяг і стиск, що забезпечує несучу здатність і просторову жорсткість конструкції.

Через відсутність проміжних опор плита набуває характеру прямокутно-оболонкової системи, у якій навантаження з центральної частини передається на кути за рахунок сумісної роботи трикутних та ромбічних комірок решітки. Стержні, що формують діагональні напрямки, зазнають найбільших осьових зусиль і відіграють ключову роль у забезпеченні міцності й стійкості всієї структури.

Таким чином, стержньова просторова плита з опиранням на чотири кутові колони характеризується:

- домінуванням осьових зусиль у стержнях,
- мембранною та оболонковою роботою,
- великою площею вільного прольоту,
- високою просторовою взаємодією елементів,

- підвищеною чутливістю до геометричних деформацій і нерівномірних навантажень.

Модель №2 – це просторово-підперта (багатопролітна) плита з нерівномірним контурним обпиранням та точковими опорами. Плита працює у просторовому, просторово-напруженому режимі, оскільки точкові опори (колони), розташовані вздовж довгих сторін, формують складний просторовий перерозподіл зусиль. У напрямку довгої сторони наявність трьох опор створює кілька прольотів, що фактично утворюють двопролітну робочу схему. У поперечному напрямку плита функціонує як нерегулярно оперта конструкція, що зумовлено різною висотою та положенням вузлів обпирання.

Модель №3 являє собою прямокутну в плані стержньову просторову плиту, що оперта на колони, розташовані по периметру. Конструкція працює як просторова стержнева система, у якій навантаження передається через систему взаємопов'язаних стержнів. Завдяки дискретному контурному підпертю формується замкнена стержнева рама, що забезпечує значну просторову жорсткість конструкції.

У кожному зі стержнів системи виникають осьові зусилля розтягу та стиску, які є основною складовою напружено-деформованого стану такої плити. Саме завдяки роботі на осьові сили забезпечується здатність конструкції ефективно перерозподіляти навантаження між колонними вузлами та внутрішньою частиною стержневої сітки.

У напрямках довгої та короткої сторін плита функціонує як багатопролітна стержнева решітчаста система, де кожна точкова опора по контуру створює окремий проліт. Така конфігурація приводить до формування комбінованого просторового режиму, у якому взаємодіють згинальні, мембранні та осьові ефекти.

Внутрішня зона конструкції працює як просторова стержнева решітка, що передає навантаження на контур через сумісну роботу численних трикутних і квадратних комірок. Це обумовлює рівномірніший розподіл зусиль, зменшує локальні деформації та забезпечує стійкість усієї плити.

Таким чином, стержньова просторова плита з обпиранням по периметру характеризується вираженою просторовою роботою, домінуванням осьових зусиль у стержнях та ефективним багатовекторним перерозподілом навантаження між опорами.

Відстань між колонами та кількість стійок для кожного варіанту моделі приведено в таблиці № 4.1.

Таблиця 4.1 Відстань між колонами та їх кількість

№ схеми	Відстань між колонами по осі X, м	Відстань між колонами по осі Y, м	Кількість колон по осі X, м	Кількість колон по осі Y, м
1	36	21	2	2
2	18	21	3	2
3	9	6/9	5	4

4.3 Матеріали для структури

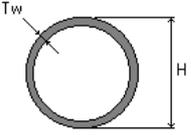
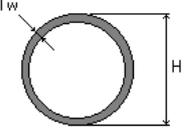
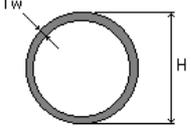
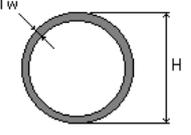
Всі елементи просторової плити прийняті із сталі будівельної. Прийнято профілі трубчатого перерізу із сталі класу С235 з характеристиками: $R_y = 240 \text{ Па} = 24,0 \text{ кН/см}^2$, $R_{yn} = 245 \text{ Па} = 24,5 \text{ кН/см}^2$, $E = 2,06 \cdot 10^8 \text{ кН/см}^2$, $\gamma = 77,0085 \text{ кН/м}^3$, $\mu = 0,3$

4.4 Характеристики жорсткостей скінчених елементів

Для виконання числових розрахунків було створено просторову модель, як складається з просторової стержньової плити та колон, на які плита спирається. Всі елементи плити мали характеристики стрижнів просторової ферми з трьома ступенями вільності. Колони апроксимувалися просторовими стержнями з шістьма ступенями свободи. Всі сполучення між стержньовими елементами прийнято шарнірними (рис. 4.4).

Характеристики параметрів жорсткості стрижнів наведено в таблиці 4.2

Таблиця 4.2 Характеристики жорсткостей конструктивних елементів
структурного покриття

Назва елемента	Поперечний переріз, см	$E, \text{т/м}^2$	$R, \text{т/м}^3$	μ	$A, \text{см}^2$	$q, \text{т/м}$
1.Стержні верхнього поясу	Труба 114x20 	$2,04 \cdot 10^7$	7,85	0,3	115,1	0,046
2.Стержні нижнього поясу	Труба 114x20 	$2,04 \cdot 10^7$	7,85	0,3	2,75	0,046
3.Розкоси структурної плити	Труба 168x25 	$2,04 \cdot 10^7$	7,85	0,3	3,23	0,088
4. Колони	Труба 273x40 	$2,04 \cdot 10^7$	7,85	0,3	3,23	0,23

4.5 Граничні умови

Структура спирається шарнірно на колони. Кріплення в узлах структури передбачається шарнірним.

4.6 Навантаження на структуру

Вітрове навантаження на конструкцію не враховується, так як зусилля від вітрового навантаження становлять приблизно 1% та їх вплив на напружено-деформований стан конструкції є несуттєвим [1].

Для міста Суми снігове навантаження становить $1,64 \text{ кН/м}^2$. Прийнято рівномірний розподіл снігового покриву по всьому покриттю оскільки ухил верхнього поясу плити є меншим за 30° [1].

У роботі використано варіант покрівлі, де профнастил опирається безпосередньо на прогони, закріплені до верхнього поясу структурної плити. У розрахунковій моделі це враховано як прикладання зосереджених навантажень від покриття та снігової дії в точки верхнього поясу плити.

Таблиця 4.3 Збір навантажень на 1 м² структурної плити

№ з/п	Назва конструктиву	Нормативне значення, кг/м ²	Коефіцієнт надійності за навантаженням γ_f	Розрахункове значення, кг/м ²
1	Наплавляємий евроруберойд «Акваізол»	10	1,2	12
2	Утеплювач – плити мінераловатні підвищеної жорсткості на синтетичному в'язучому	10	1,3	13
3	Пароізоляція – 1 шар руберойду	5	1,2	6
4	Профнастил	15	1,1	16,5
5	Прогони покриття із гнучого профілю [18 (14,96 кгс/м.п)]	1,29	1,1	1,42
6	Власна вага структури	Задається в ПК ЛІРА-САПР автоматично		
ВСЬОГО ПОСТІЙНЕ:		116,1		138,421
	<i>Тимчасове</i>			
7	Снігове (за ДБН В .1.2-2:2006)	167	1,14	190,38
ВСЬОГО ТИМЧАСОВЕ:		167		
РАЗОМ пост+тимч. без врахування власн. ваги структурної плити		244,18		328,8

На рис. 4. 5-4.7 наведено схеми завантаження скінченоелементної моделі плити трьома типами завантажень: від власної ваги елементів; від ваги покриття; від снігового навантаження (рис. 4.7).

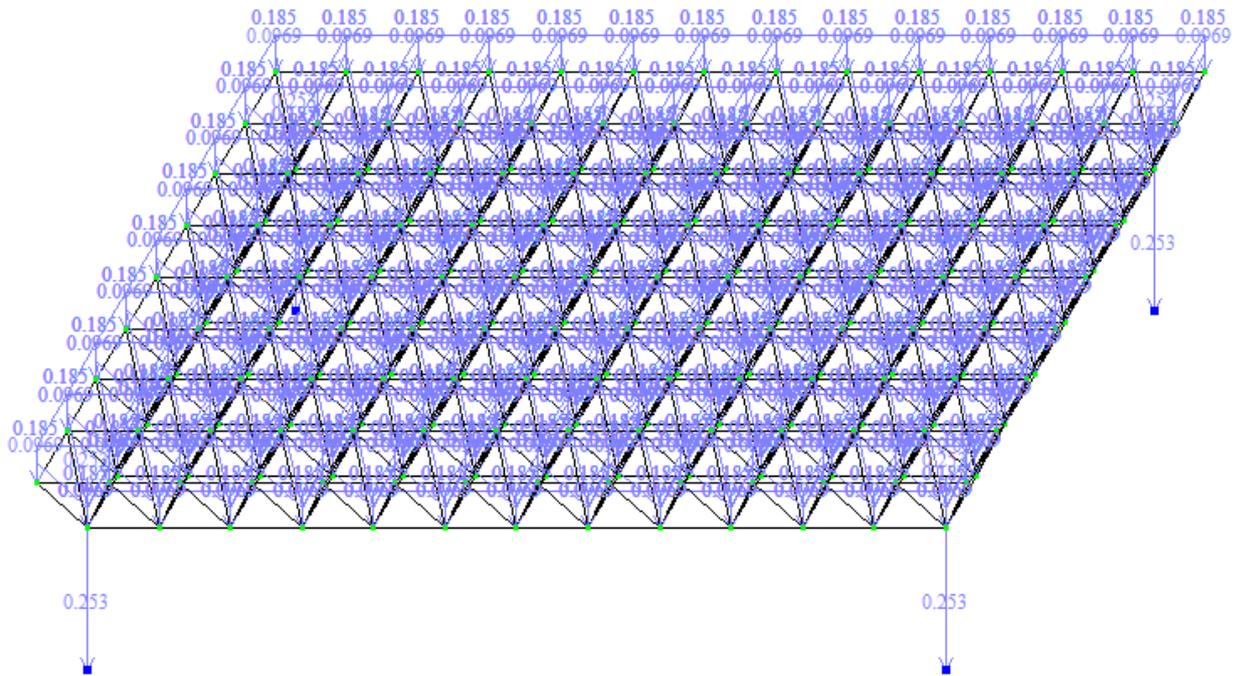


Рис.4.5 Завантаження вузлів верхнього поясу навантаженням від власної ваги конструкції плити (Завантаження 1)

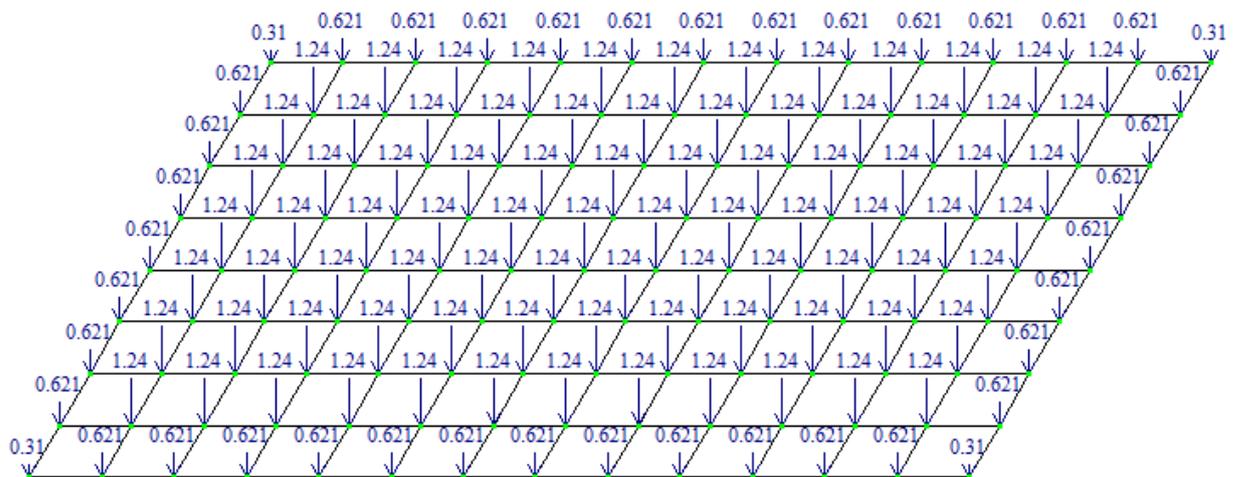


Рис.4.6 Завантаження на вузли верхнього поясу від конструктивних шарів (Завантаження 2)

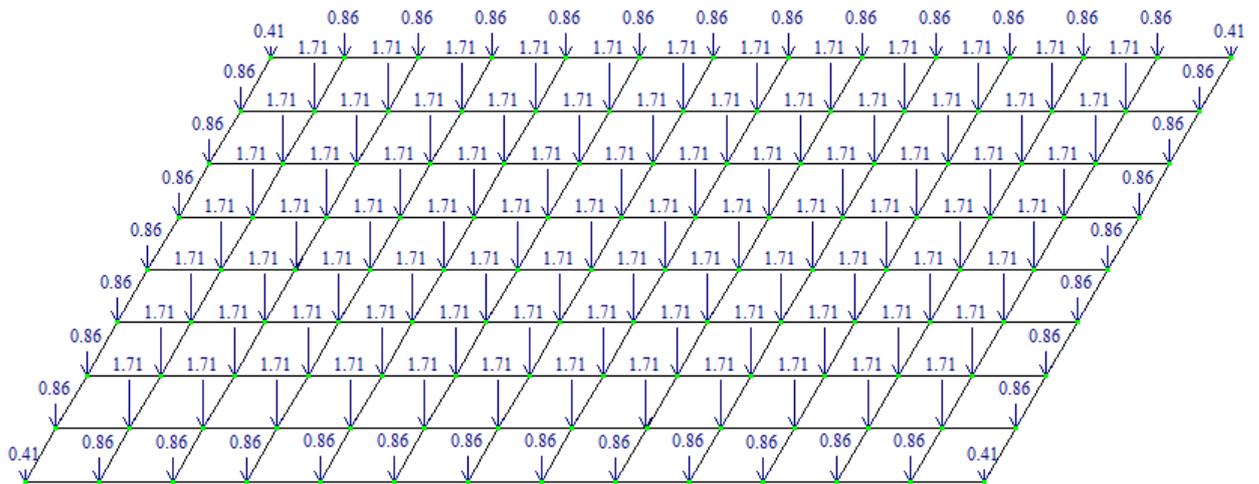


Рис.4.7 Завантаження вузлів верхнього поясу навантаженням від снігу
(Завантаження 3)

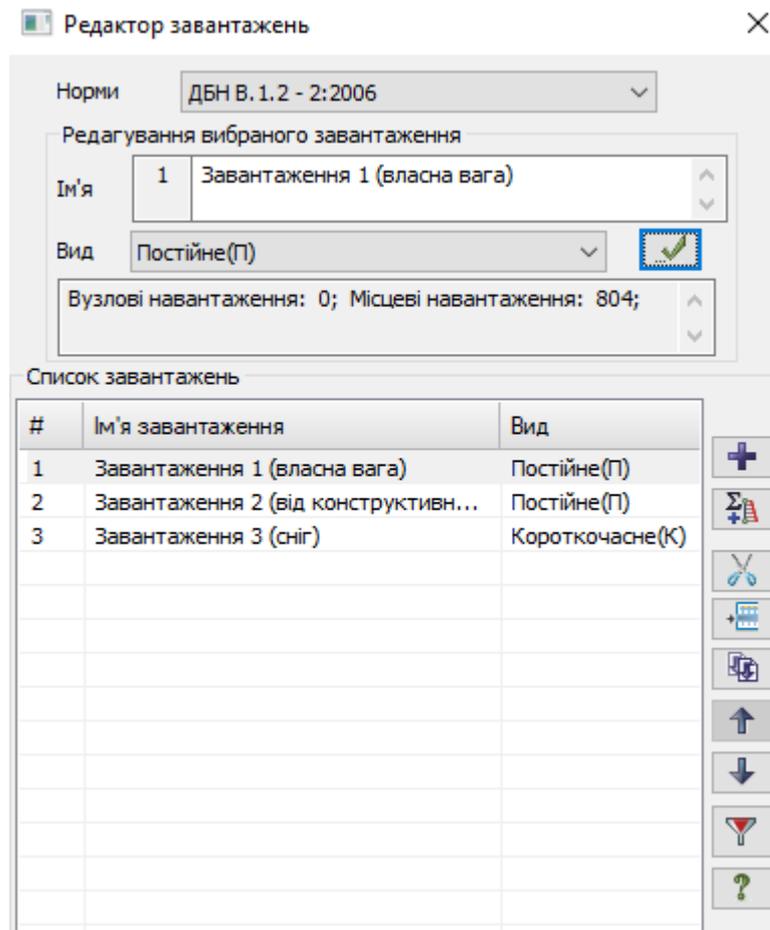
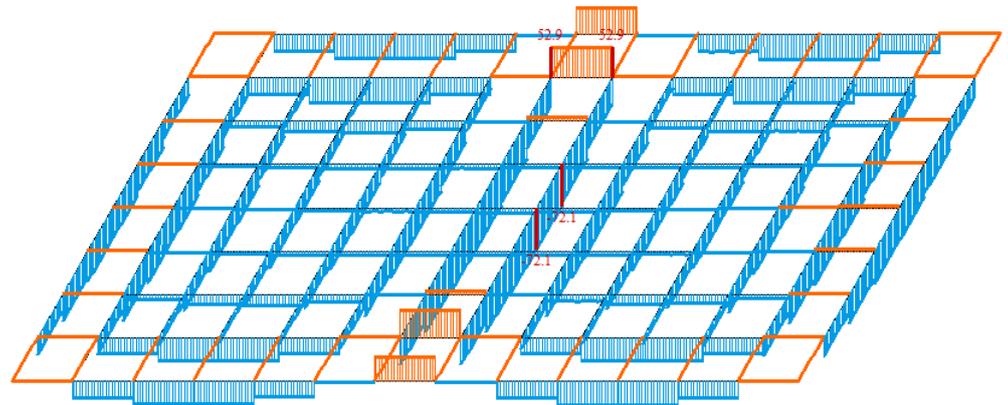


Рис.4.8 Вікно завантажень

б)

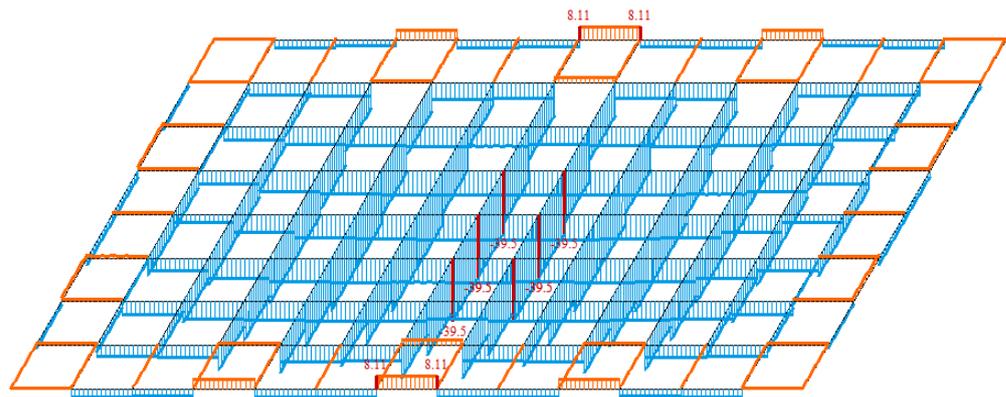
2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Эпюра N
Единицы измерения - т



Отм. + 3.000
Минимальное значение -72.1374; Максимальное значение 52.9286

в)

2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Эпюра N
Единицы измерения - т

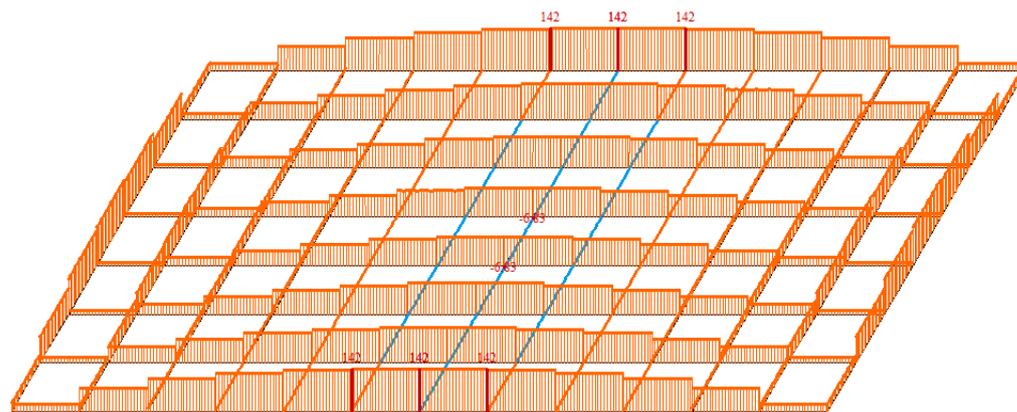


Отм. + 3.000
Минимальное значение -39.5354; Максимальное значение 8.11087

Рис.5.1 Эпюры осевых усилий N від РСН2 для верхнього поясу структури:
схема №1 ($N_{max} = -113,6$ т; $N_{max} = +8,5$ т) -а; схема №2 ($N_{max} = -72,13$ т;
 $N_{max} = +52,9$ т) -б; схема №3 ($N_{max} = -39,5$ т; $N_{max} = +8,11$ т) -в

а)

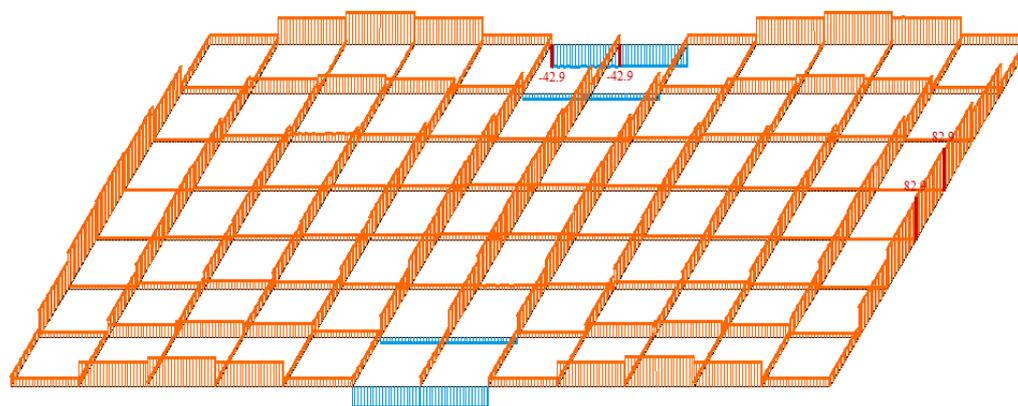
2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Этюра N
Единицы измерения - т



Отм. 0.000
Минимальное значение -6.83121; Максимальное значение 142.231

б)

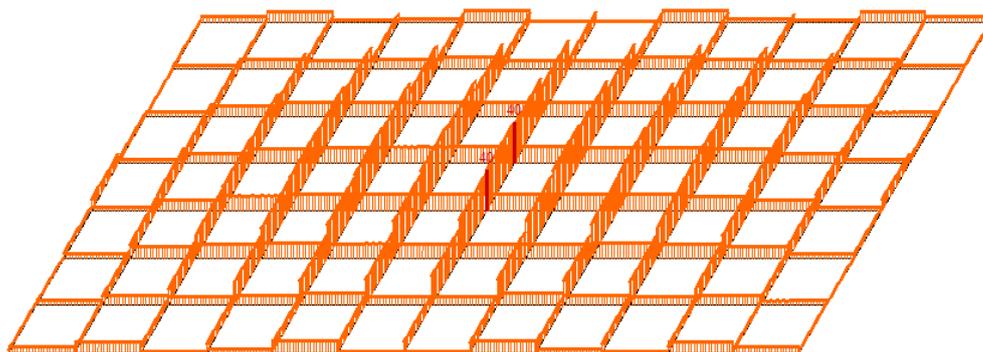
2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Этюра N
Единицы измерения - т



Отм. 0.000
Минимальное значение -42.9197; Максимальное значение 82.9042

в)

2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Этюра N
Единицы измерения - т



Отм. 0.000
Максимальное значение 39.9883

Рис.5.2 Епюри осьових зусиль N від РСН 2 для нижнього поясу структури:
схема №1 ($N_{max}=142,3$ т; $N_{max}=-6,83$ т) –а; схема №2 ($N_{max}=82,9$ т; $N_{max}=-42,92$ т)–б; схема №3 ($N_{max}=39,99$ т; $N_{max}=0$)–в

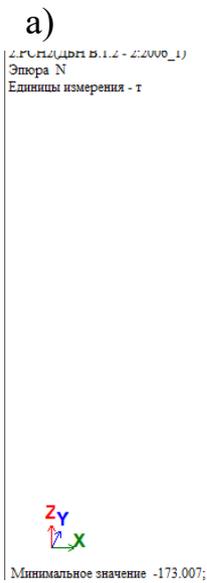


Рис.5.4 Епюри осьових зусиль N від PCH2 для колон моделі: схема №1 (Nmax= -173 т) –а; схема №2 (Nmax= -254 т) –б; схема №3 (Nmax= -82,7 т) –в

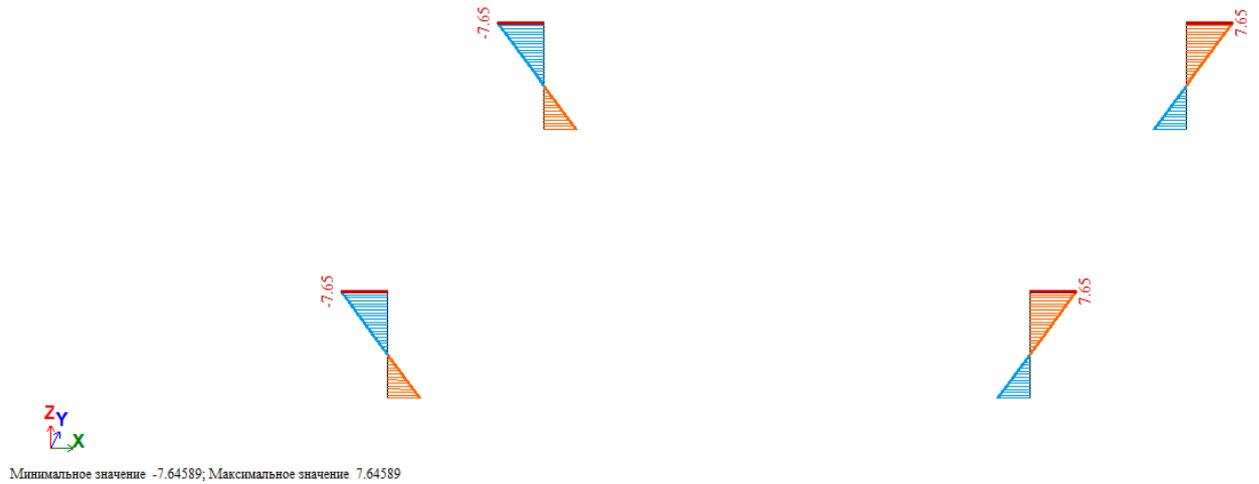


Рис.5.5 Епюри моментів згину M_u від РСН2 для колон моделі: схема №1
 ($M_{max} = -7,65$ т·м; $M_{max} = 7,65$ т·м)

У таблиці 5.1 наведено максимальні значення зусиль стиску та зусиль розтягу, що виникають у верхньому та нижньому поясах, а також у розкосах конструкцій, що досліджуються.

Таблиця 5.1 Максимальні зусилля N в поясах структури

№ схеми	Верхній пояс		Нижній пояс		Розкоси	
	Стиск	Розтяг	Стиск	Розтяг	Стиск	Розтяг
1	-113,6	8,5	-6,83	142,3	-72,4	61,5
2	-72,5	52,9	-42,92	82,9	-87,5	55,8
3	-39,5	8,11	0	39,9	-30,4	14,1

На рис.5.6 наведено графічне відображення інформації з таблиці 5.1.

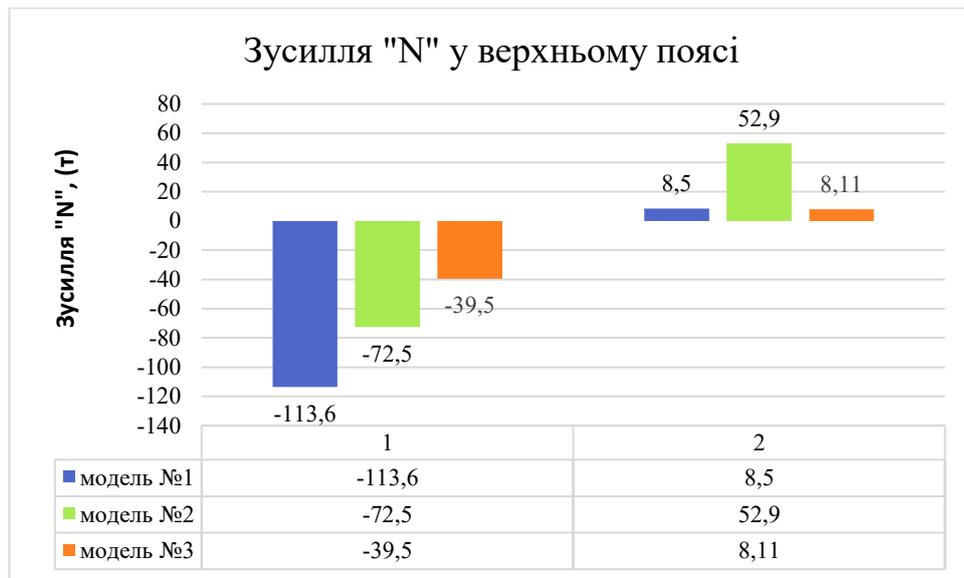


Рис. 5.6 Максимальні зусилля "N" у верхньому поясі моделей плит від РСН 2

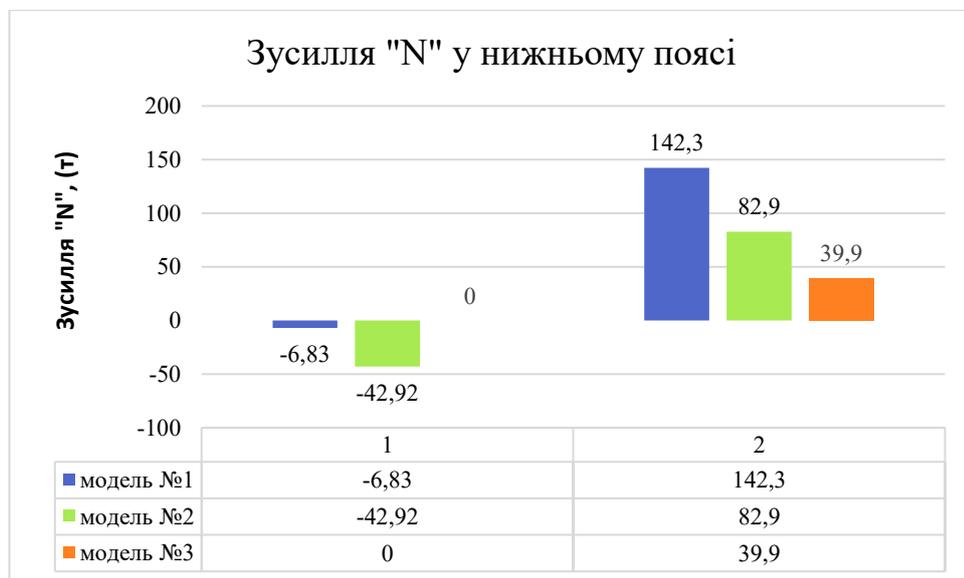


Рис.5.7 Максимальні зусилля "N" у нижньому поясі моделей плит від РСН 2

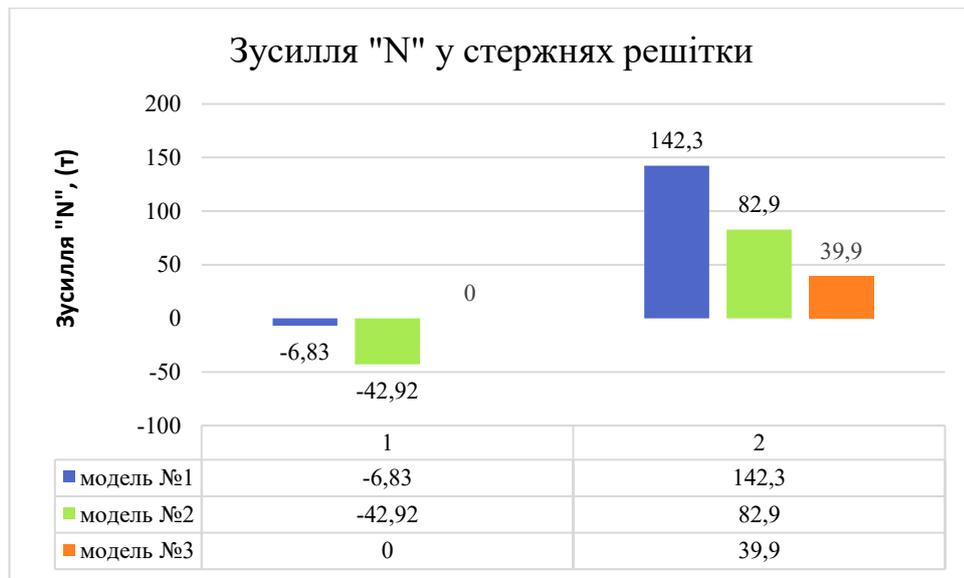


Рис.5.8 Максимальні зусилля "N" у нижньому поясі моделей плит від РСН 2

В таблиці 5.2 наведено максимальні зусилля N в колонах моделей.

Таблиця 5.2 Максимальні зусилля N в колонах моделей

№ схеми	N, [Т]	M _y , [Т·м]		M _z , [Т·м]	
1	-173	-7,65	7,65	-4,0	4,0
2	-254	-1,5	1,5	-2,0	2,0
3	-82,7	-1,03	1,03	-1,48	1,48

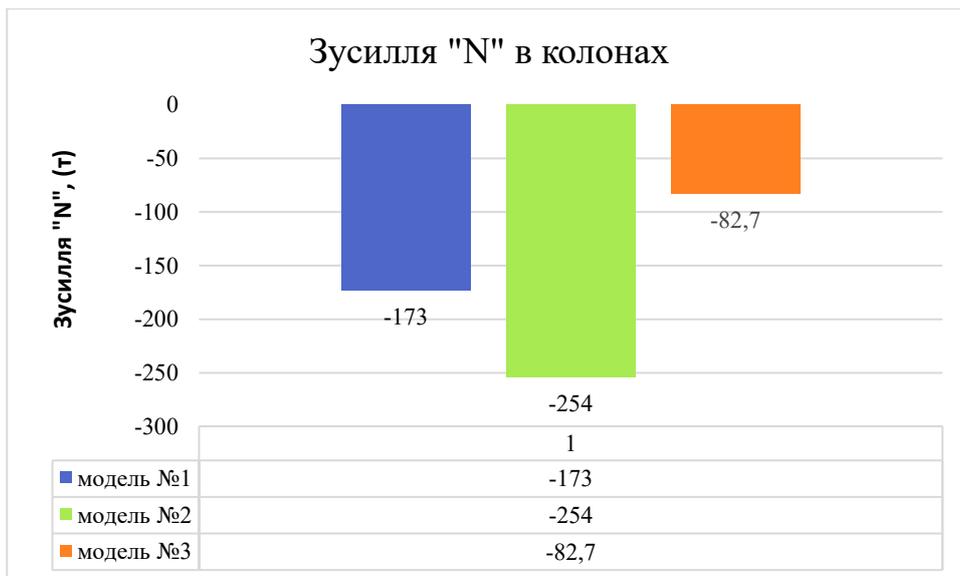


Рис.5.9 Максимальні зусилля "N" в колонах для моделей плит від РСН 2

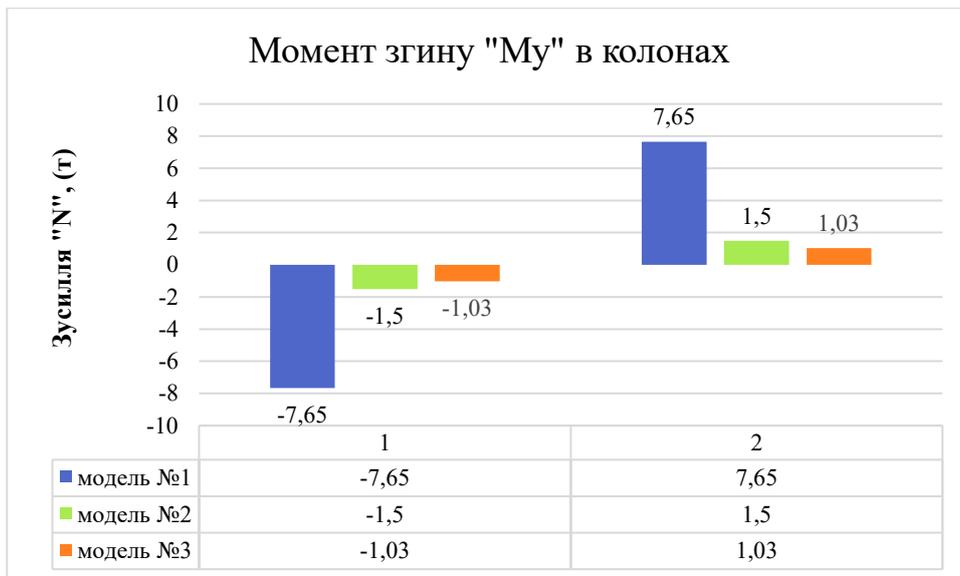


Рис.5.10 Максимальні моменти згину "My" (в площині XOZ) в колонах для моделей структурних плит від РСН 2

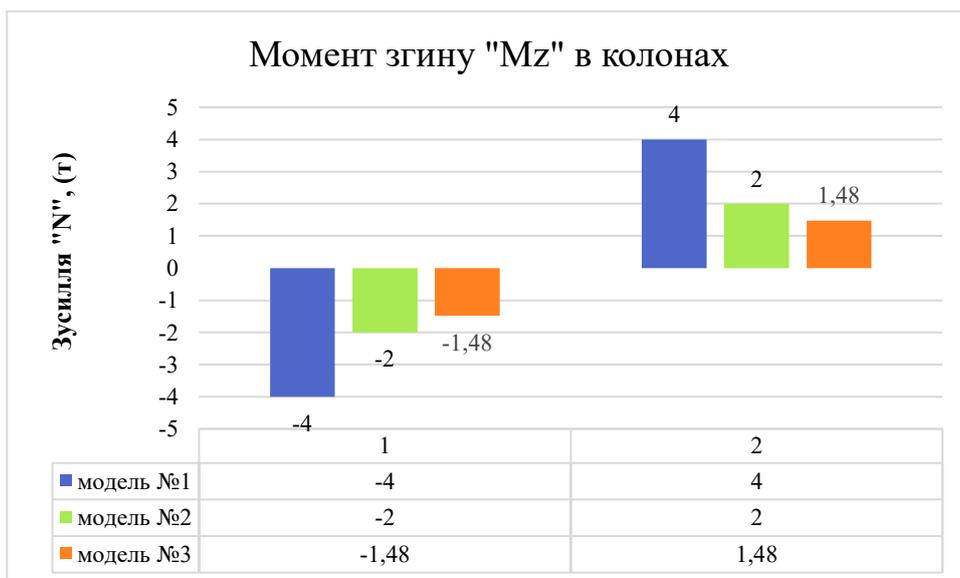


Рис. 5.11 Максимальні моменти згину "Mz" (в площині YOZ) в колонах для моделей структурних плит від РСН 2

5.2 Аналіз напруженого стану

Конструктивні групи стержнів плити

В елементах поясних систем та розкосах спостерігається закономірний перерозподіл осьових сил N при переході від схеми №1 до схем №2 та №3. Отримані результати узгоджуються з теоретичними уявленнями про

вирівнювання напруженого стану в стержньових структурах при зміні їхньої схеми роботи чи конструктивних параметрів.

Пояси. Стиск. Максимальні зусилля стиску у верхньому поясі для схеми №2 зменшуються порівняно зі схемою №1 у 1,57 рази, а для схеми №3 в 2,88 рази. У нижньому поясі зменшення ще більш виражене: у схемі №2 зусилля стиску збільшуються (у 6,28 рази відносно схеми №1), що свідчить про перерозподіл навантаження між поясами, натомість у схемі №3 стиск у нижньому поясі зовсім зникає, переходячи фактично до нульових значень.

Пояси. Розтяг. Максимальні зусилля розтягу у верхньому поясі у схемі №2 збільшуються порівняно з першою схемою у 6,22 рази, тоді як у схемі №3 вони практично повертаються до початкового рівня (зменшення у 1,05 рази). У нижньому поясі розтяг зменшується: у схемі №2 — у 1,72 рази, а у схемі №3 — у 3,57 рази відносно схем №1, що підтверджує тенденцію до вирівнювання зусиль у нижній частині структури.

Розкоси. Стиск. У розкосах максимальні стискуючі зусилля у схемі №2 дещо збільшуються — у 1,21 рази, що вказує на перехід частини навантаження від поясів до діагональних елементів. У схемі №3 ж стискуючі зусилля зменшуються уже значно — у 2,38 рази відносно схеми №1, що свідчить про зміну їхньої участі в забезпеченні просторової жорсткості структури.

Розкоси. Розтяг. Розтяг у розкосах у схемі № 2 зменшується у 1,10 рази порівняно зі схемою №1, а у схемі №3 це зменшення досягає 4,36 рази, що узгоджується з тенденцією загального перерозподілу сил на користь поясних елементів у більш раціональній третій схемі.

Таким чином, отримані результати демонструють закономірне зменшення та вирівнювання максимальних осьових зусиль у стержнях при переході від схеми №1 до схем №2 і №3, що підтверджує більш ефективний розподіл напружень у вдосконалених варіантах конструктивної системи.

Колони

У колонах стержньових моделей спостерігається чітка залежність величини осьових та згинальних зусиль від кількості та розташування опор.

Зміна схеми розташування колон істотно впливає на перерозподіл навантажень між колонами, що повністю узгоджується з теоретичними уявленнями про роботу стержньових плит на опорах.

Осьова сила N. У схемі №1, де плита спирається на чотири колони, розташовані по кутах, максимальне стискаюче зусилля становить -173 т. У схемі №2, де застосовано три колони, розташовані вздовж довших сторін, стискаюче зусилля значно зростає: до -254 т, що є збільшенням у 1,47 рази порівняно зі схемою №1. Це зростання пояснюється зменшенням кількості опор та концентрацією навантаження на меншій кількості колон. Для схеми №3, де використано дев'ять колон по периметру плити, осьові зусилля різко зменшуються: до $-82,7$ т, що у 2,09 рази менше, ніж у схемі №1, і в 3,07 рази менше, ніж у схемі №2. Такий результат підтверджує ефективність збільшення кількості опор у вирівнюванні та зниженні навантаження на окремі елементи.

Згинальні моменти M_y .

У схемі №1 максимальні значення M_y становлять $7,65$ т·м. У схемі №2 вони різко зменшуються до $1,5$ т·м, тобто у 5,1 рази порівняно зі схемою №1.

У схемі №3 момент M_y зменшується ще більше — до $1,03$ т·м, що у 7,43 рази менше, ніж у схемі №1. Зменшення згинальних моментів підтверджує покращення умов роботи колон при збільшенні їхньої кількості та рівномірнішому розподілі реакцій опор.

Згинальні моменти M_z .

Аналогічна тенденція спостерігається й для моментів M_z . У схемі №1: $4,0$ т·м, у схемі №2: зменшення до $2,0$ т·м, тобто в 2 рази, у схемі №3: до $1,48$ т·м, що у 2,7 рази менше, ніж у схемі №1.

Таким чином, моменти M_z демонструють пропорційне зменшення при збільшенні кількості опор, що підтверджує кращий просторовий розподіл жорсткості та зусиль.

Результати показують, що зі збільшенням числа колон та наближенням їхнього розташування до замкненої системи (схема №3) відбувається суттєве зниження осьових сил і згинальних моментів у кожній колоні. Це свідчить про

високу ефективність багатоточкового опирання стержньових плит і повністю підтверджує закономірний характер перерозподілу зусиль у таких конструктивних системах.

5.3 Деформативність моделей плит, що досліджуються

Таблиця 5.3 містить значення максимальних переміщень вузлів у напрямку осі Z від РСН2 для розрахункових схем плити.

Таблиця 5.3 Максимальні переміщення f_z

$f_z, [мм]$		
Схема №1	Схема №2	Схема №3
-32,9	-10,22	-4,86

На рис. 5.12 наведено епюри максимальних прогинів стержня верхнього поясу вздовж осі Z для різних моделей структурної плити від РСН2.

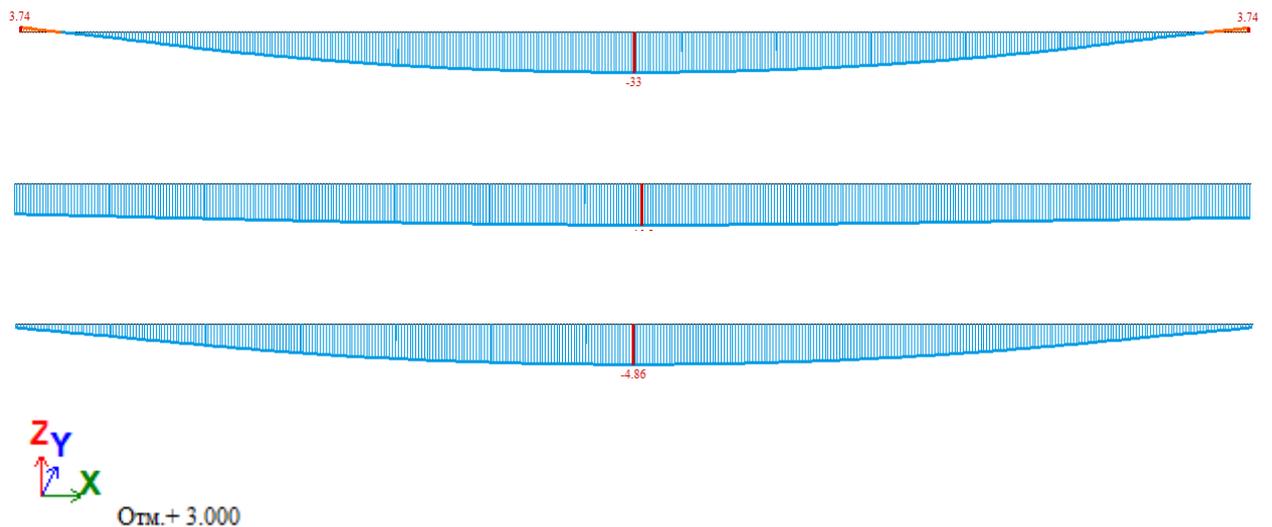


Рис. 5.12 Епюра максимальних прогинів f_z в площині XOZ стержня верхнього поясу для схеми №1 від РСН 2: для схеми №1-а; для схеми №2-б; для схеми №3-в

На рис. 5.13 наведено мозаїку прогинів f_z та деформовані схеми від РСН2 для моделей стержньової плити, що досліджується.

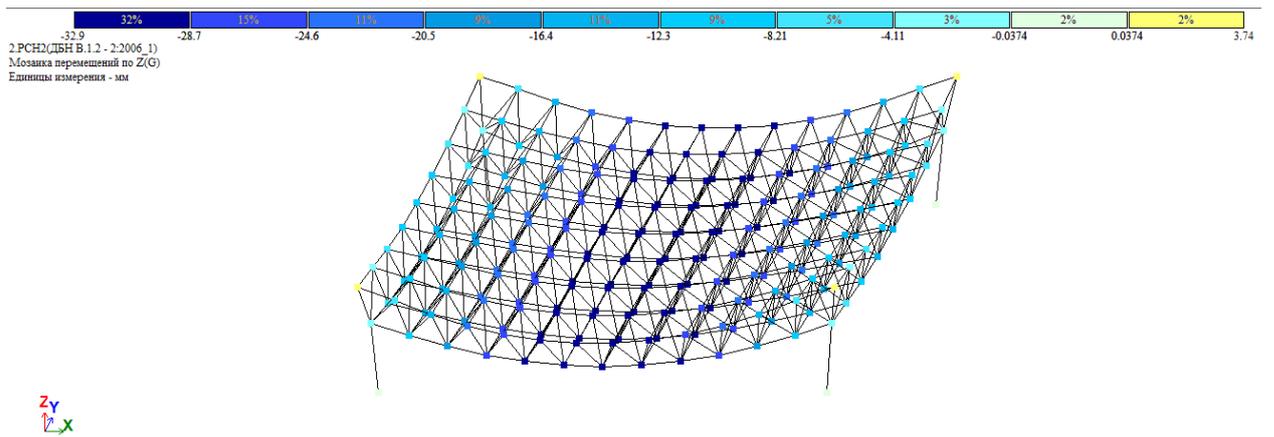


Рис.5.13 Мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема для схеми №1 від РСН2

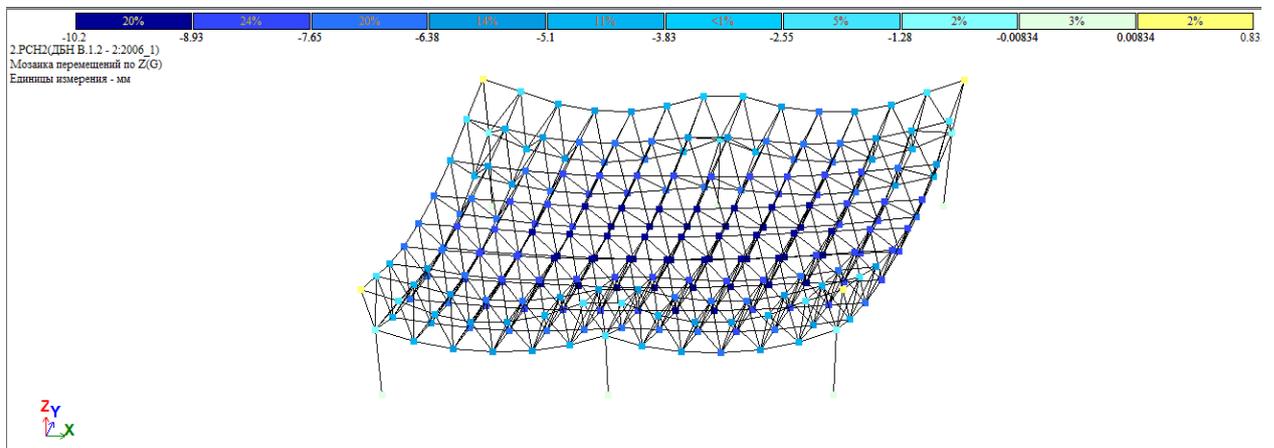


Рис.5.14 Мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема для схеми №2 від РСН2

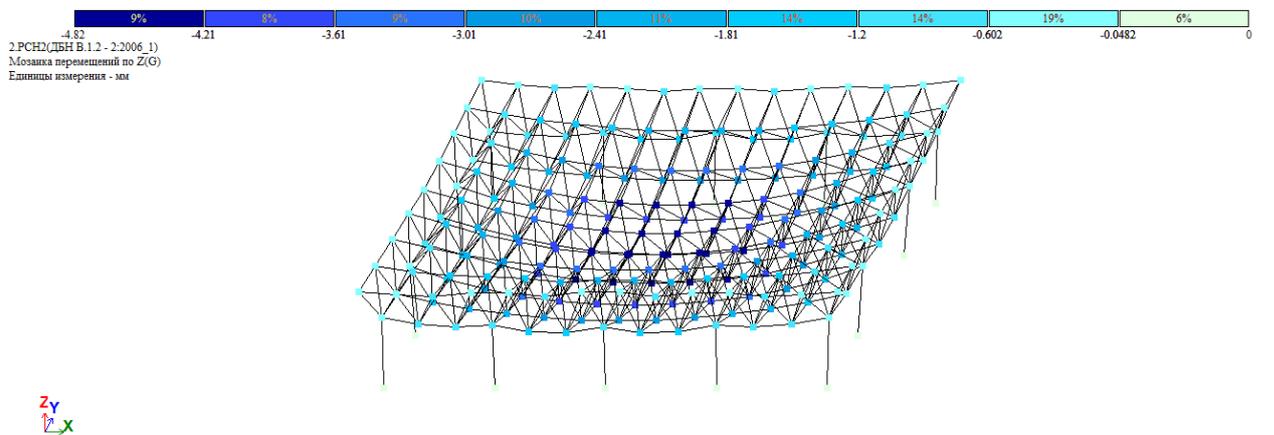


Рис.5.15 Мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема для схеми №3 від РСН2

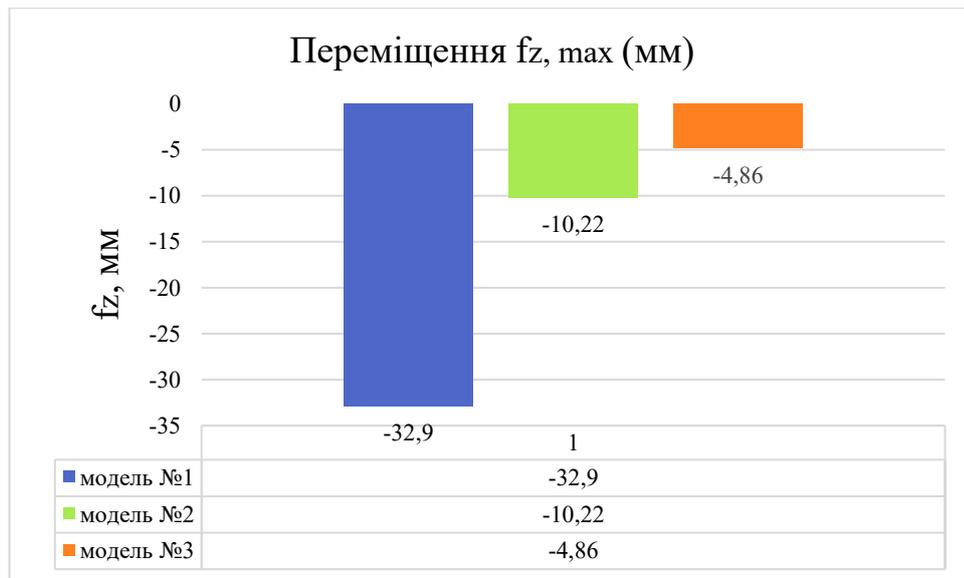


Рис. 5.16 Максимальні переміщення по вертикалі вузлів верхнього поясу розрахункових моделей: для моделі №1 ($z_{\max}=-32,9$ мм)-а; для моделі №2 ($z_{\max}=-10,22$ мм)-б; для моделі №3 ($z_{\max}=-4,86$ мм)-в

В таблиці 5.4 наведено вертикальні переміщення вузлів структурних плит для найбільш деформованого стержнів верхнього поясу в перерізі 1-1.

Таблиця 5.4 Вертикальні переміщення вузлів структурних плит

№ вузла	Переміщення вузлів моделей по вертикалі, мм		
	№ схеми		
	1	2	3
1	3,74	-7,49	-0.39
2	-4,92	-8,04	-1.45
3	-14,2	-8,63	-2.53
4	-21,65	-9,16	-3.46
5	-27,21	-9,6	-4.15
6	-30,91	-9,94	-4.59
7	-32,76	-10,17	-4.82
8	-32,76	-10,2	-4.82
9	-30,91	-10,05	-4.59
10	-27,21	-9,79	-4.15
11	-21,65	-9,46	-3.46
12	-14,21	-9,08	-2.53
13	-4,92	-8,7	-1.45
14	3,74	-8,37	-0.39

На рис. 5.17 наведено графіки прогинів по вертикалі в узлах структури в її поперечному перерізі 1-1 (рис. 5.13).

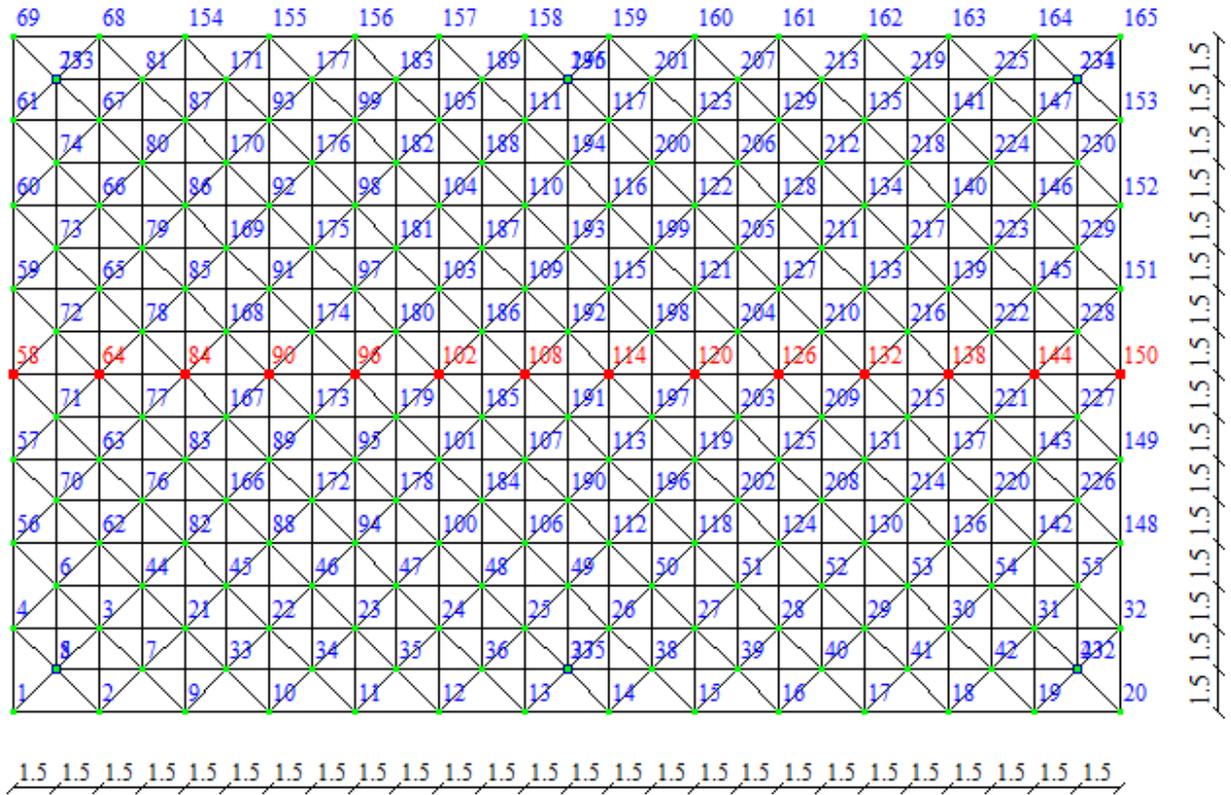


Рис.5.17 Поперечний переріз 1-1, в якому досліджуються прогини конструкції (на прикладі моделі №2)

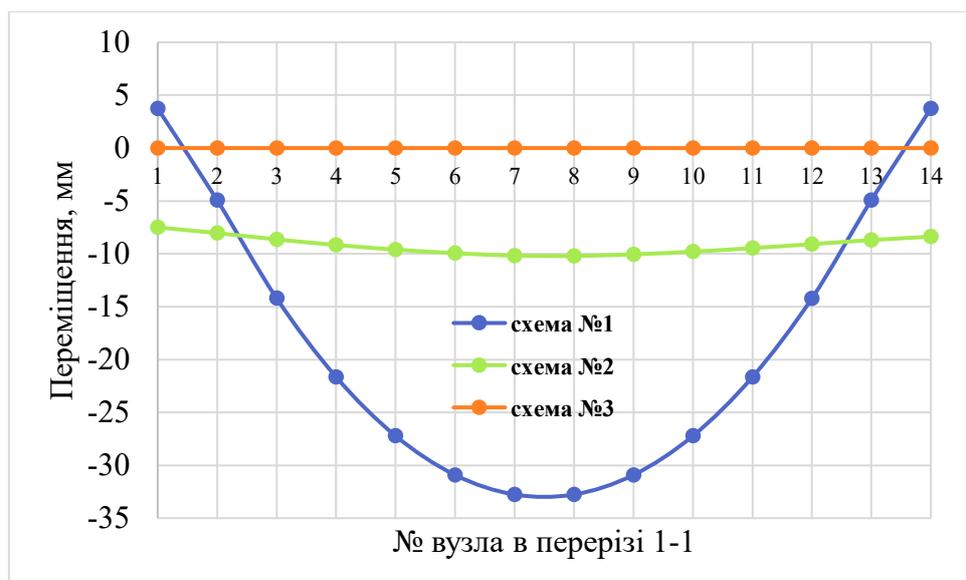


Рис. 5.18 Графіки прогинів по вертикалі в узлах структури в її поперечному перерізі 1-1

Як показано на рис. 5.18, структура зі схемою №1, що має чотири опори по кутах, є найменш жорсткою. Натомість схема №3 з опорами, розташованими по периметру плити, забезпечує максимальну жорсткість. У схемі №2 максимальний прогин зменшився порівняно зі схемою №1 в 3,22 рази. У схемі №3 максимальний прогин зменшився порівняно зі схемою №1 в 6,77 рази. Порівняно між собою, схема №3 має прогин у 2,10 рази менший, ніж схема №2.

Крива на рис. 5.18 для схеми №1 свідчить, що має місце робота плити з малою кількістю опор — центр прогинається значно сильніше. Для схеми №2 спостерігається центральний прогин помітно менший, що вказує на часткове зменшення зорганізованого вигину завдяки розташуванню опор (трьох колон) уздовж довгих сторін плити. Крива прогину для схеми №3 являє собою майже плоску криву з невеликими від'ємними прогинами в центральній зоні і невеликим додатнім підйомом на крайніх вузлах. Це свідчить про рівномірніше сприйняття навантаження й значно більшу жорсткість плити.

Гранично допустимі прогини для трьох моделей плит визначені за формулою (5.1) згідно норм [10].

Схема №1. Для плити як чотириточкової опорної системи (схема №1):

$$f = \frac{L}{250} = \frac{36000}{250} = 144 \text{ мм} \quad (5.1)$$

Схема №2. Для перевірки вертикальних переміщень у моделі №2 як груповий (ефективний) проліт слід приймати відстань в 18,0 м між суміжними опорними стійками вздовж напрямку, що розглядається (це крок колон по довгій стороні).

$$f = \frac{L}{250} = \frac{18000}{250} = 72 \text{ мм} \quad (5.2)$$

Схема №3. За розрахунковий проліт доцільно приймати відстань між суміжними колонними осями (центр–центр), тобто 1,5 м у обох напрямках (уздовж і поперек плити). При периметральному розташуванні колон плита працює як сукупність малих панелей; локальні вигини і моменти визначаються

відстанню між найближчими опорами, тому нормативні перевірки прогину роблять по цій відстані.

$$f = \frac{L}{250} = \frac{1500}{250} = 6 \text{ мм} \quad (5.3)$$

Як показано на рис. 5.18, у таблиці 5.4 та впливає з формул (5.1)–(5.3), деформативність усіх моделей перебуває в допустимих межах. Іншими словами, максимальні прогини від РСН2 не перевищують гранично допустимих значень, визначених формулами (5.1)–(5.3) відповідно до норм [10].

5.4 Стійкість моделей

2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Форма втрати стійкості в гл. с. 1
Коефіцієнт 5.4356

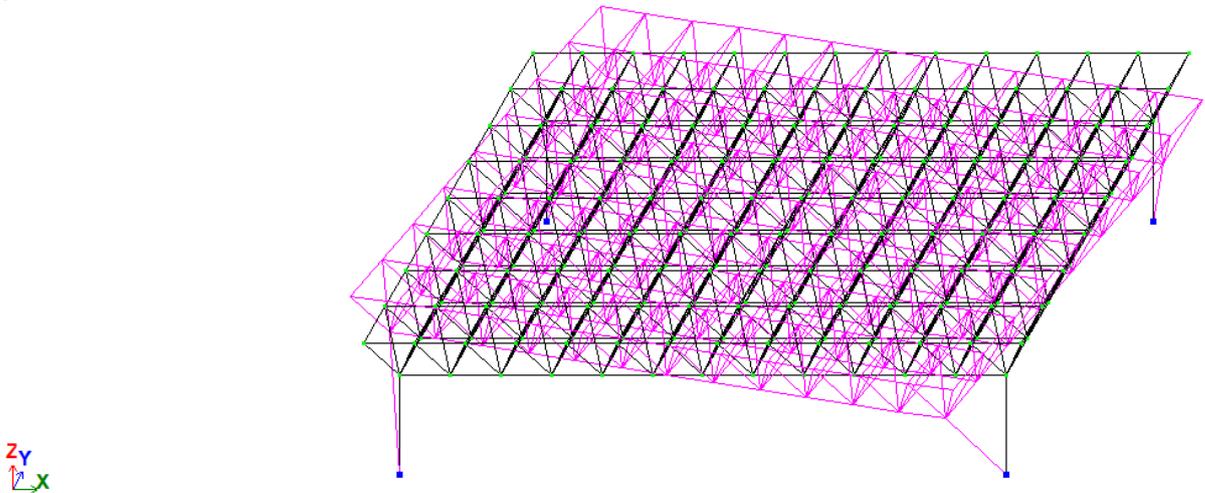


Рис. 5.19 Форма втрати стійкості від РСН2 для схеми №1

2.PCH2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Форма потери устойчивости в гл. с. 1
Коеффициент 5.93248

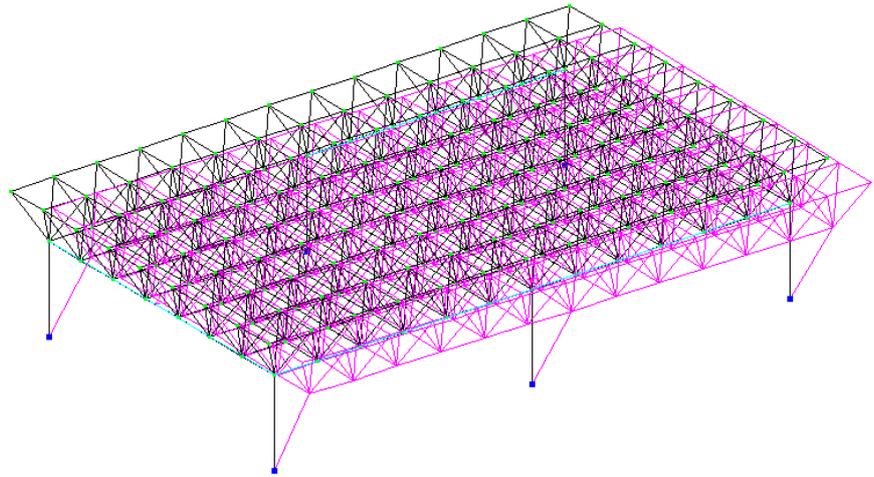


Рис.5.20 Форма втрати стійності від РСН2 для схеми №2

2.PCH2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Форма потери устойчивости в гл. с. 1
Коеффициент 19.135

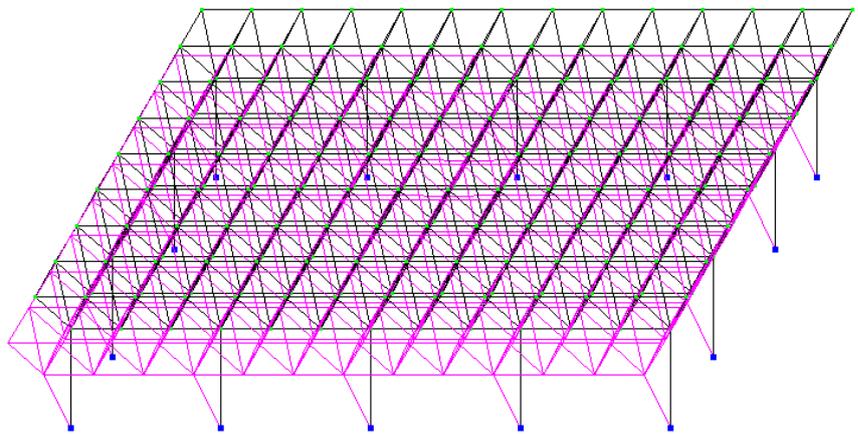


Рис.5.21 Форма втрати стійності від РСН2 для схеми №3

В таблиці 5.5 наведено значення мінімального коефіцієнту стійкості (від РСН2) для моделей плити, що досліджуються.

Таблиця 5.5. Коефіцієнт n стійкості

n	Схема №1	Схема №2	Схема №3
	5,44	5,93	19,14

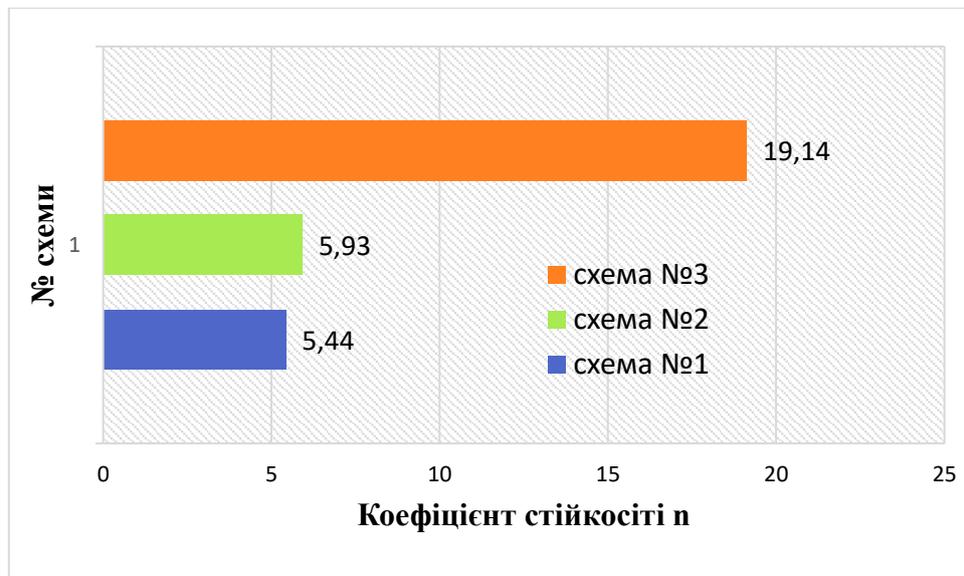


Рис.5.22 Максимальне значення коефіцієнт стійкості n

Отримані результати свідчать, що всі моделі забезпечують необхідний рівень просторової стійкості під дією РСН2, оскільки коефіцієнти n суттєво перевищують одиницю.

Найменше значення n має схема №1, що вказує на нижчу, але все ще достатню загальну стійкість конструкції. Схема №2 демонструє дещо кращу стійкість завдяки більш раціональному розташуванню опор або підсилювальних елементів.

Найбільш ефективною виявилась схема №3 — її коефіцієнт стійкості майже втричі більший, ніж у перших двох моделей. Це свідчить про значно вищу здатність конструкції зберігати стійкість під дією навантаження РСН2, що зумовлено оптимальною просторовою роботою стержнів та кращими умовами обпирання.

Отже, схема №3 є найбільш стійкою, тоді як Схеми №1 та №2 забезпечують достатній, але істотно нижчий запас стійкості у порівнянні з третьою моделлю.

5.5 Оцінка використання несучої здатності перерізів стержнів із жорсткостями, прийнятими у вихідних даних

В таблиці 5.5 наведено % використання несучої здатності перерізу різними групами стержньових елементів для трьох схем структурної плити, що досліджується.

Таблиця 5.6 Використання несучої здатності перерізу різними для різних груп стержнів конструкції плити

Назва конструктиву	Несуча здатність перерізу, %		
	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Верхній пояс	23,7	15	8,2
Нижній пояс	29,6	17,3	8,3
Розкоси	28,7	34,7	12,1
Стійки (колони)	51,8	47,4	16,9

На рис. 5.23-5.26 наведено графічне зображення даних з таблиці 5.5 щодо максимальної несучої здатності окремих груп конструктивних елементів аналітичної моделі структурної плити.



Рис. 5.23 Максимальна несуча здатність перерізу стержнів верхнього поясу

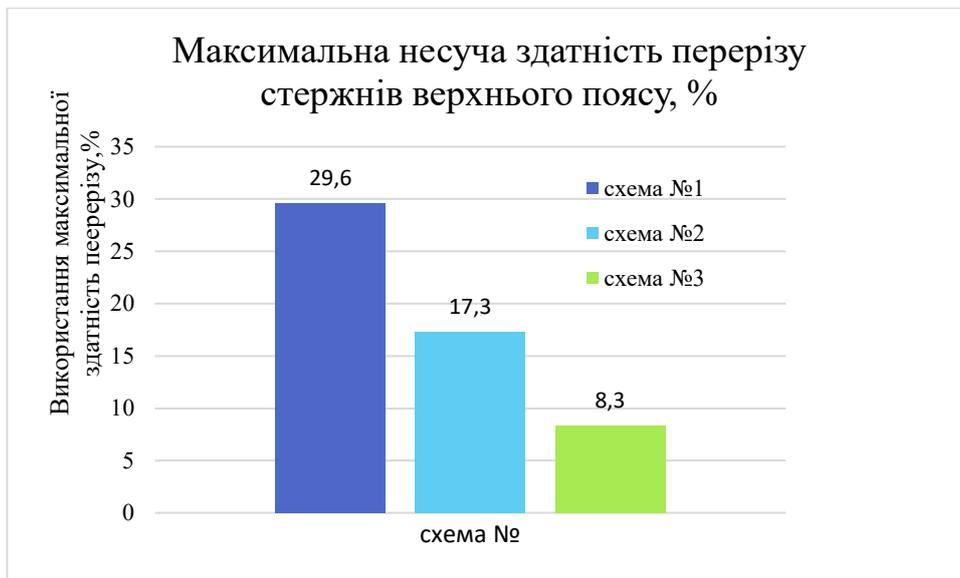


Рис. 5.24 Максимальна несуча здатність перерізу стержнів нижнього поясу

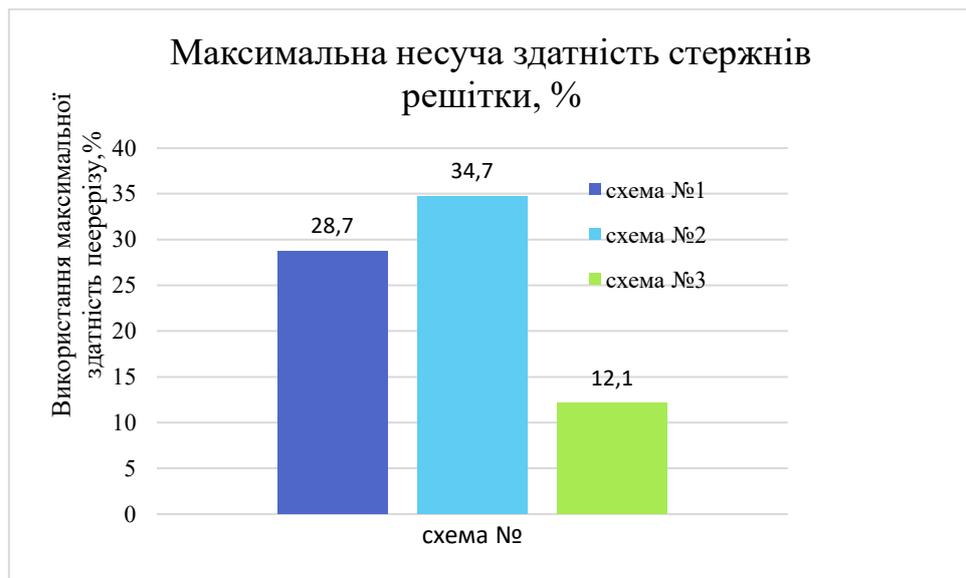


Рис. 5.25 Максимальна несуча здатність перерізу розкосів (похилих стержнів)

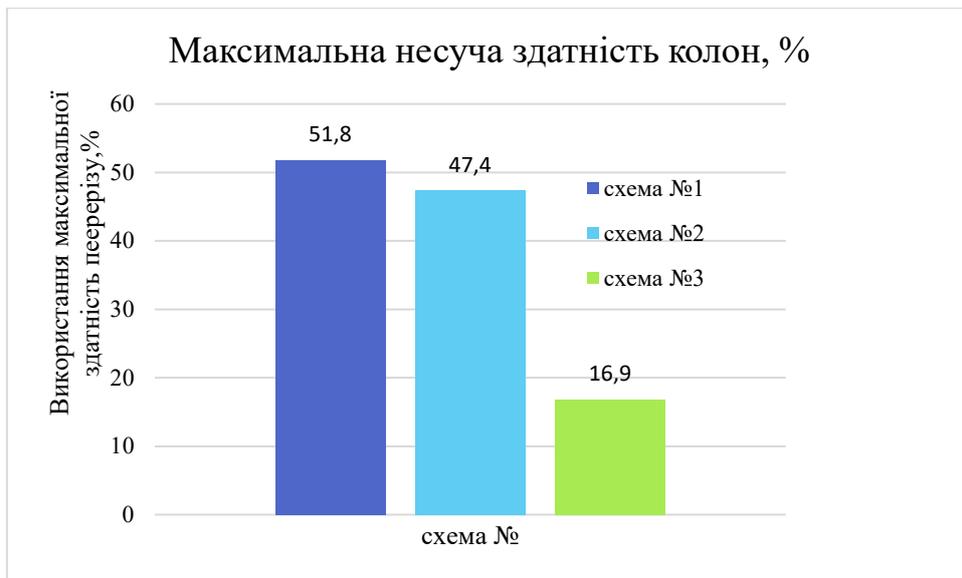


Рис. 5.26 Максимальна несуча здатність перерізу колон

На рис. 5.27-5.30 наведено мозаїки результатів розрахунку за 1-ю групою граничних станів сталевих елементів з поперечними перерізами, призначеним в вихідних даних. На шкалі показано % несучої здатності перерізу, що прийнято в першому наближенні.

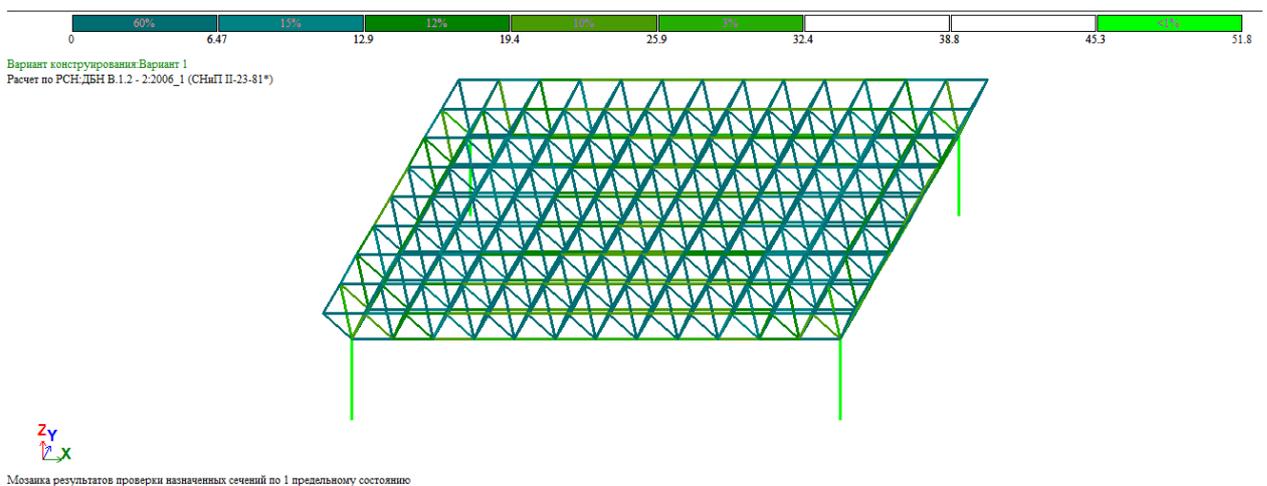


Рис. 5.27 Мозаїка результатів розрахунку за 1ю групою граничних станів сталевих елементів з поперечними перерізами, призначеним в вихідних даних, % несучої здатності для **Схеми №1** (одне значення на весь елемент)

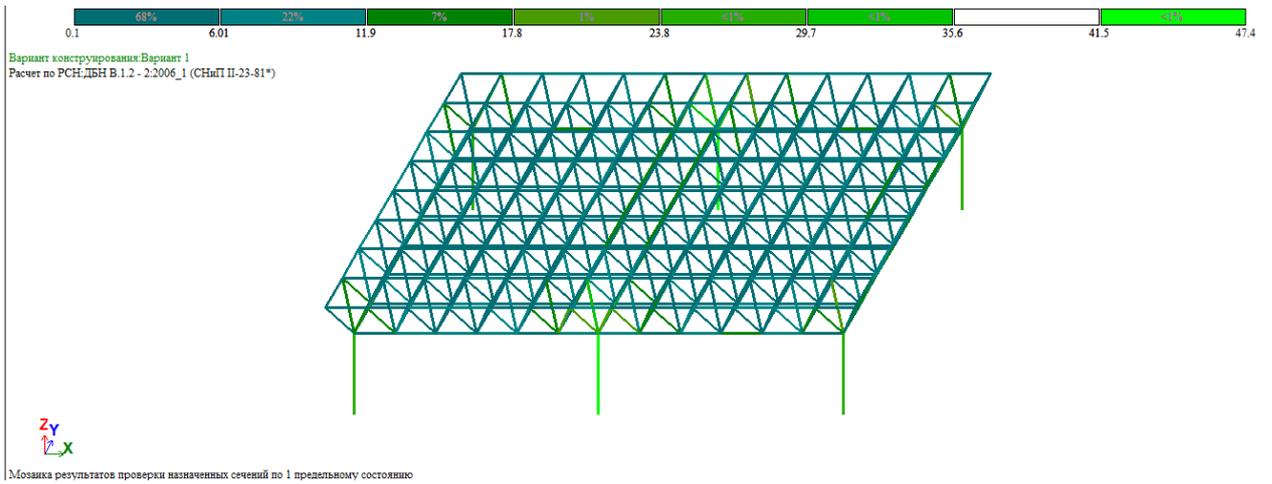


Рис. 5.28 Мозаїка результатів розрахунку за 1ю групою граничних станів сталевих елементів з поперечними перерізами , призначеним в вихідних даних, % несучої здатності для **Схеми №2** (одне значення на весь елемент)

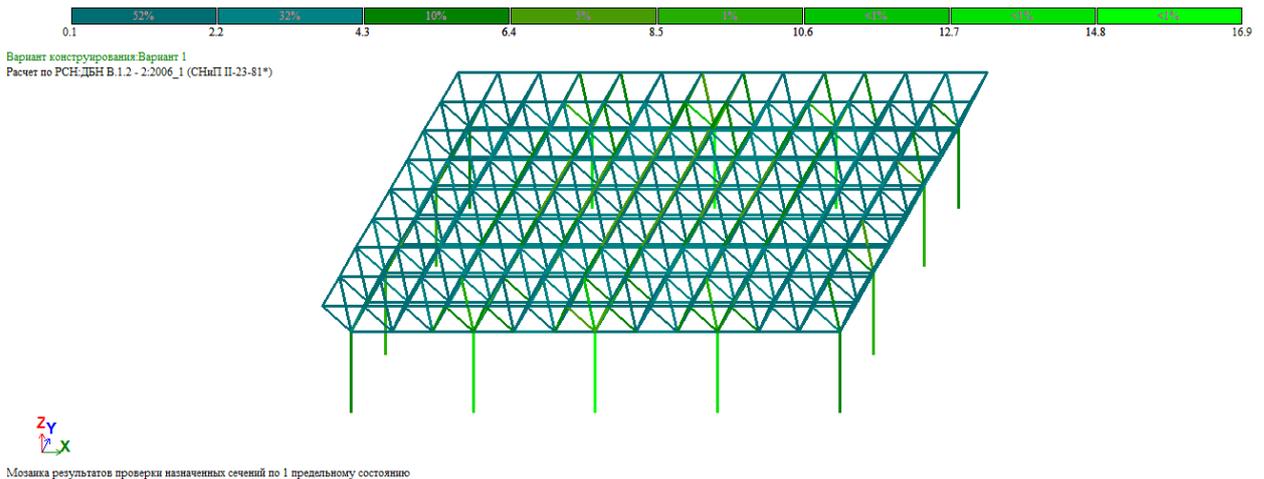


Рис. 5.29 Мозаїка результатів розрахунку за 1ю групою граничних станів сталевих елементів з поперечними перерізами , призначеним в вихідних даних, % несучої здатності для **Схеми №3** (одне значення на весь елемент)

5.6 Висновки щодо використання несучої здатності перерізів стержнів із жорсткостями, прийнятими у вихідних даних

Аналіз використання несучої здатності різних груп стержнів (верхній пояс, нижній пояс, розкоси, стійки) дає змогу оцінити рівномірність роботи конструкції та її стійкість у трьох схемах.

Схема №1. Ця модель плити є найбільш напружена та найменш рівномірно працююча. У схемі №1 елементи конструкції працюють із найбільшими рівнями використання несучої здатності: верхній пояс – 23,7%; нижній пояс – 29,6% (максимальне навантаження серед усіх схем); розкоси – 28,7%; стійки – 51,8%. Високі значення свідчать, що конструкція використовується інтенсивніше, а запас міцності менший порівняно зі схемами №2 та №3. Рівномірність роботи елементів є невеликою, оскільки найбільші деформації та напруження зосереджені в нижньому поясі та розкосах. Загалом схема №1 характеризується найменшою стійкістю, але водночас найвищою матеріалоефективністю – конструкція працює ближче до свого потенціалу.

Схема №2 є оптимальнішою та характеризується більш рівномірною роботою конструкції. У схемі №2 спостерігається більш збалансоване використання несучої здатності: верхній пояс – 15%; нижній пояс – 17,3%; розкоси – 34,7% (єдиний елемент із підвищеним навантаженням); стійки – 47,4%. Розкоси працюють інтенсивніше, ніж інші елементи, що свідчить про активне включення діагональних зв'язків у загальну роботу конструкції, що може позитивно впливати на стійкість під дією горизонтальних та складних навантажень. Порівняно зі схемою №1, навантаження знижені на 30–45%, що підвищує запас міцності та надійність. Схема №2 демонструє кращу стійкість, ніж схема №1, завдяки більш помірному рівню напружень та активній роботі розкосів.

Схема №3 є найбільш стійкою та найменш напруженою моделлю. У схемі №3 усі несучі елементи мають найнижчі відсотки використання несучої здатності: верхній пояс – 8,2%; нижній пояс – 8,3%; розкоси – 12,1%; стійки – 16,9%. Це свідчить про найбільший запас міцності, найменші деформації та потенційно найвищу довговічність. Такий розподіл означає: збільшену жорсткість конструкції, раціональнішу геометрію. Рівномірність роботи елементів у цій схемі найкраща, що позитивно впливає на загальну стійкість.

5.7 Підбір нових перерізів стержньових елементів в модулі «Метал»

ПК Ліра-САПР

Модуль проектування металевих конструкцій у ЛІРА-САПР дав змогу визначити найбільш раціональні з погляду міцності перерізи для верхнього й нижнього поясів, розкосів та колон. У таблицях 5.7–5.12 наведено обрані типи перерізів і розраховану масу цих елементів для різних варіантів структурної плити

Таблиця 5.7 Нові перерізи елементів структурних плит за варіантами

№ схеми	Переріз (профіль труби), прийнятий при першій ітерації	Переріз, підібраний ПК Ліра-САПР за результатами статичного розрахунку		
		№ типу перерізу в ПК Ліра-САПР	Сталь	Профіль труби
<i>Верхній пояс</i>				
1	ТБ 242x32	55	С 235	ТБ146x12
2	ТБ 242x32	139	С 235	ТБ 152x4,5
3	ТБ 242x32	77	С 235	ТБ 89x4,5
<i>Нижній пояс</i>				
1	ТБ 242x32	17	С 235	ТБ 203x7
2	ТБ 242x32	21	С 235	ТБ 180x5
3	ТБ 242x32	1	С 235	ТБ 102x4
<i>Розкоси</i>				
1	ТБ 168x25	21	С 235	ТБ 152x5,5
2	ТБ 168x25	238	С 235	ТБ 133x6
3	ТБ 168x25	118	С 235	ТБ 68x5,5
<i>Колони</i>				
1	ТБ 273x40	88,89,90,91	С 235	ТБ 377x10
2	ТБ 273x40	231	С 235	ТБ 299x7,5
		232	С 235	ТБ 299x8
		233	С 235	ТБ 325x7,5
		234	С 235	ТБ 377x11

		235	С 235	ТБ 426x9
		236	С 235	ТБ 299x7,5
3	ТБ 273x40	81,81,81	С 235	ТБ 133x4,5
		82,82,82,82	С 235	ТБ 194x5
		83,83,83,83	С 235	ТБ 203x6,5
		84, 84	С 235	ТБ 245x6,5
		85	С 235	ТБ 133x4,5

Таблиця 5.8 Підібрані перерізи для верхнього поясу
(Труби сталеві електрозварні (ДСТУ 8943:2019)

№ схеми	№ типу перерізу	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	46	С235	ТБ146x12	0.03966	687	27,25
2	52	С235	ТБ 152x4,5	0.01637	687	11,25
3	24	С235	ТБ 89x4,5	0.00938	687	6,44

Таблиця 5.9 Підрахунок ваги нижнього поясу
(Труби сталеві електрозварні (ДСТУ 8943:2019)

№ схеми	№ типу перерізу	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	24	С235	ТБ 203x7	0.03384	561	18,98
2	24	С235	ТБ 180x5	0.02158	561	12,11
3	12	С235	ТБ 102x4	0.00967	561	5,42

Таблиця 5.10 Підрахунок ваги розкосів
(Труби сталеві електрозварні (ДСТУ 8943:2019)

№ схеми	№ типу перерізу	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	69	С235	ТБ 152x5,5	0.01987	1528,48	30,37
2	89	С235	ТБ 133x6	0.01879	1528,48	28,72
3	39	С235	ТБ 68x5,5	0.00848	1528,48	12,96

Таблиця 5.11 Підрахунок ваги колон
(Труби сталеві електрозварні (ДСТУ 8943:2019)

№ схеми	№ типу перерізу	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина, м	Кількість колон в моделі, шт	Загальна вага колон в моделі, т
1	88,89,90,91	С 235	ТБ 377x10	0.09051	6,0	4	2,17
2	231	С 235	ТБ 299x7,5	0.05392	6,0	1	0,32
	232	С 235	ТБ 299x8	0.05741	6,0	1	0,344
	233	С 235	ТБ 325x7,5	0.05873	6,0	1	0,35
	234	С 235	ТБ 377x11	0.09929	6,0	1	0,60
	235	С 235	ТБ 426x9	0.09255	6,0	1	0,56
	236	С 235	ТБ 299x7,5	0.05392	6,0	1	0,32
3	81,81,81	С 235	ТБ 133x4,5	0.01426	6,0	4	0,60
	82,82,82,82	С 235	ТБ 194x5	0.02331	6,0	4	0,56
	83,83,83,83	С 235	ТБ 203x6,5	0.03150	6,0	4	0,76
	84, 84	С 235	ТБ 245x6,5	0.03823	6,0	2	0,46
	85	С 235	ТБ 133x4,5	0.01426	6,0	1	0,086

Обчислення загальної ваги стержньової плити та стійок виконано в таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 Підрахунок ваги всієї конструкції

№ схеми	Верхній пояс	Нижній пояс	Розкоси	Вага структурної плити	Колони	Всього вага, т	% структурної плити в загальній вазі моделі
1	27,25	18,98	30,37	76,60	2,17224	78,77	98,21
2	11,25	12,10	28,72	52,07	2,49492	54,56	95,43
3	6,44	5,42	12,96	24,83	2,202	26,95	92,15

На рис. 5.30–5.33 представлено діаграми розподілу ваги конструктивних елементів за різними схемами — для верхнього й нижнього поясів, розкосів та колон.

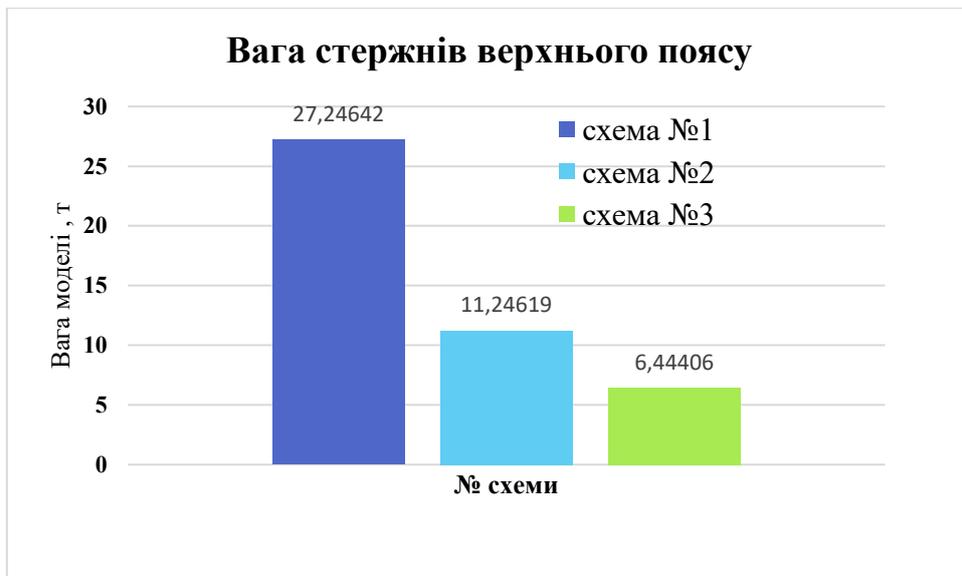


Рис 5.30 Підрахунок ваги стержнів верхнього поясу



Рис. 5.31 Підрахунок ваги стержнів нижнього поясу



Рис. 5.32 Підрахунок ваги стержнів решітки

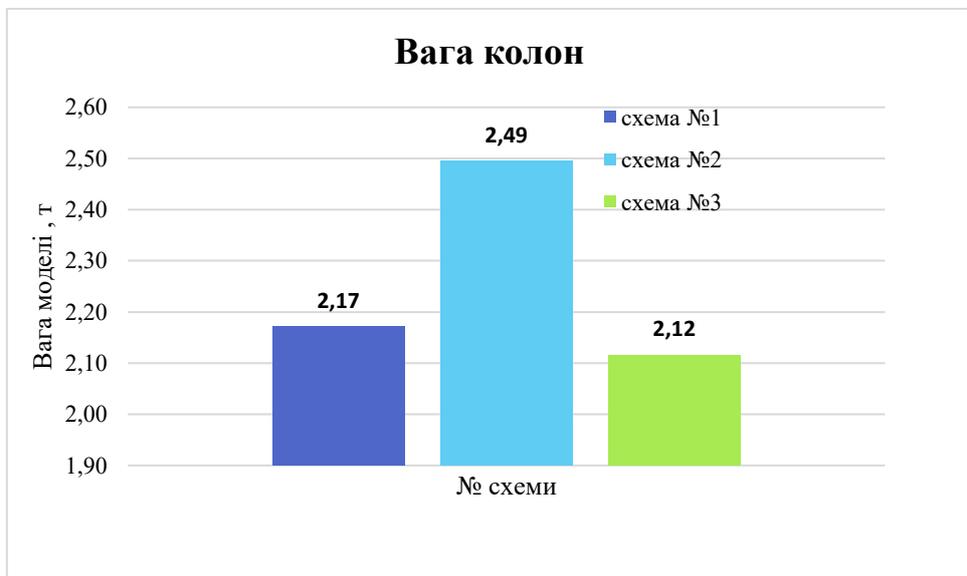


Рис. 5.33 Підрахунок ваги колон в схемах

На рис. 5.33 наведено порівняння ваги структурної плити з вагою колон.

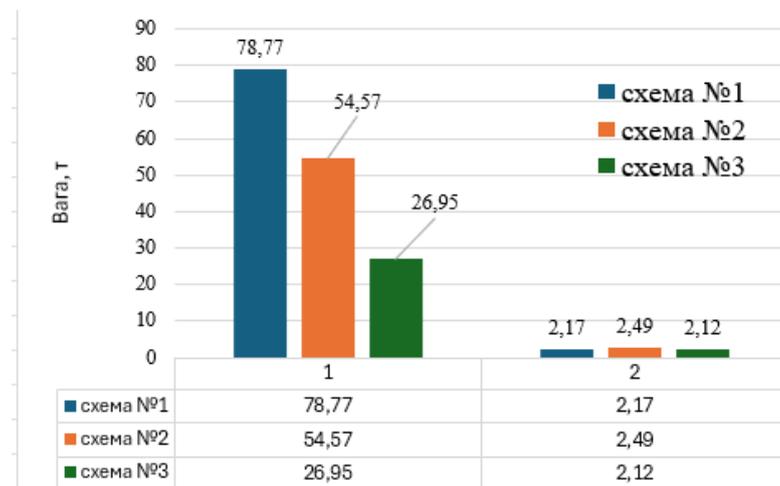


Рис. 5.34 Загальна вага моделі та вага колон в складі моделі

Моделі істотно відрізняються за масою стержневих елементів (верхнього пояса, нижнього пояса та розкосів), що безпосередньо впливає на загальну вагу плити. Вага колон у всіх моделях залишається практично однаковою й становить близько 2,2–2,5 т. Тому основні відмінності зумовлені саме різною конфігурацією та щільністю стержневої сітки.

Модель 1 є наймасивнішою, має найбільшу густоту стержнів і найбільший обсяг металу. Колони становлять лише малу частину ваги, яка складає приблизно 2,7%. Така схема є найважчою та найбільш матеріалоємною.

Модель 2 є істотно легшою за модель 1. В моделі 2 вага зменшена майже на 32%. Незначне збільшення ваги колон не впливає на загальну картину. Частка самої плити становить 95%. Це конструкція середньої матеріалоємності.

Модель 3 є найлегшою. Так, в цій моделі вага плити в 3 рази менша, ніж у моделі 1, і у 2 рази менша, ніж у моделі 2. Вага колон становить близько 8 % від загальної ваги, що є найбільшою часткою серед моделей, але загальна вага залишається мінімальною. Це найекономніший варіант.

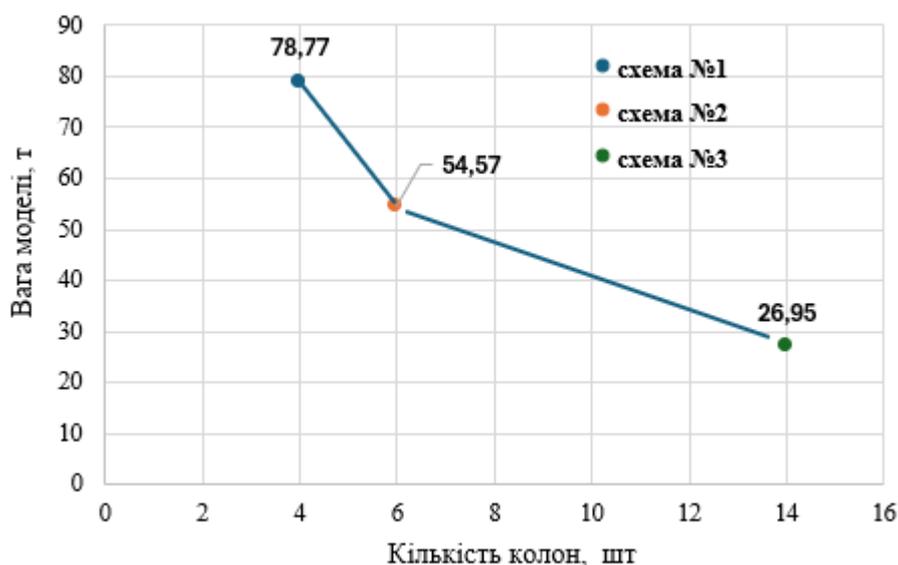


Рис. 5.35 Зміна ваги конструкції в залежності від кількості колон відповідно до варіантів їх розташування (1 варіант – 4 колони, 2 варіант – 6 колон, 3 варіант – 14 колон)

Зі збільшенням кількості колон вага конструкції зменшується (див. рис.5.35). Зменшення ваги носить нелінійний характер. Найбільше зменшення відбувається між 6 та 14 колонами, тобто введення додаткових колон у конструкцію дає суттєвий ефект. Більша кількість колон забезпечує ефективніший розподіл навантаження, що дає змогу використовувати легші перекриття та елементи жорсткості, тому загальна вага конструкції зменшується.

Оптимальна кількість колон залежить від компромісу між вагою конструкції та функціональними вимогами. Адже збільшення кількості колон зменшує вагу, але може ускладнювати планування та збільшувати вартість монтажу.

РОЗДІЛ 6

ВИСНОВКИ

1. Просторова стрижнева плита, форма якої наслідує геометрію природних кристалів, є високоефективним типом перекриття, здатним перекривати великі прольоти – від 12 до 36 метрів – без потреби в додаткових опорах.
2. Стержньово-плитна структурна система належить до таких будівельних конструкцій, які дуже чутливо реагують на зміну окремих параметрів. До таких параметрів відносять сукупність факторів, що помітно впливають на напружено-деформований стан плити. Їх також називають *регуляторами зусиль*.
3. Зміна навіть одного з цих параметрів, за умови незмінності решти, може суттєво трансформувати напружено-деформований стан конструкції. Так, варіювання стріли підйому (товщини плити), геометричної форми базового елемента або схеми обпирання (кількості та розташування опор) може значно змінити розподіл зусиль у стержнях. Іншими словами, ці фактори визначають характер перерозподілу зусиль за незмінних інших характеристик — планових розмірів конструкції, величини навантаження та попередньо прийнятої жорсткості системи.

4. Збільшення кількості опор у стержньово-плитній системі суттєво знижує та вирівнює осьові сили і моменти в поясах, розкосах та колонах. Перехід від схеми №1 до №2 і №3 приводить до закономірного перерозподілу навантажень: у поясах і розкосах зусилля зменшуються, а їхній розподіл стає рівномірнішим. У колонах зі збільшенням кількості опор різко зменшуються як осьові сили, так і згинальні моменти (M_y , M_z), що підтверджує ефективність багатоточкового обпирання та покращення роботи конструкції загалом.

5. Схема №1 з чотирма опорами є найменш жорсткою, тоді як схема №3 з периметральними опорами – найжорсткіша. Максимальні прогини зменшуються: у схемі №2 – в 3,22 раза, в схемі №3 – у 6,77 раза порівняно зі схемою №1. Прогин у схемі №3 в 2,10 раза менший, ніж у схемі №2. Криві прогинів підтверджують: схема №1 має значний центральний прогин, схема №2 – помірний, а схема №3 — майже рівномірну жорстку роботу плити. Розрахункові допустимі прогини для трьох схем становлять 144 мм, 72 мм та 6 мм відповідно дотримані, а отже деформативність всіх моделей знаходиться в межах норм.

6. Усіх три моделі мають достатню стійкість, але схема №1 є найслабшою, схема №2 має трохи кращі характеристики, а схема №3 є найефективнішою, оскільки її коефіцієнт стійкості майже утричі більший, що забезпечує найвищий запас стійкості під дією РСН2.

7. Аналізуючи результати розрахунку моделей із попередньо прийнятими жорсткостями, можна зробити наступні висновки: схема №1 працює найнапруженіше й найменш рівномірно, з найвищим використанням несучої здатності. Схема №2 – помірніша й рівномірніша, із дещо більшим навантаженням на розкоси. Схема №3 — найжорсткіша й найстійкіша, з мінімальними напруженнями та найкращою рівномірністю роботи елементів.

8. Модель 1 – найважча й найбільш матеріалоемна. Модель 2 є помітно легшою. Її вага приблизно менша на 32% аніж вага моделі №1. Модель 3 є найлегшою та найбільш економною: вага плити в 2–3 рази менша, ніж у інших

моделей. Колони майже не впливають на різницю у вазі. Отже, за параметром матеріалоемності найоптимальнішим варіантом конструктивного вирішення плити буде модель, що спирається по контуру на колони (схема №3).

ЛІТЕРАТУРА

1. Chilton J. (1999). Space Grid Structures. Routledge
<https://doi.org/10.4324/9780080498188>
2. Ashtul S.A. & Patil S.N. (2020). Review on Study of Space Frame Structure System. International Research Journal of Engineering and Technology, 7(4)
3. Space Frame Structure; an analysis of its benefit by Constro Facilitator. Retrieved from: <http://surl.li/ogzyc>
5. Лучко, Й.Й., Назаревич, Б.Д., Ковальчук, В.В. Конструкції будівель і споруд : підруч. / Й.Й. Лучко, Б.Д. Назаревич, В.В. Ковальчук. — Київ : Каменяр, 2018. — 745 с.
6. Makowski, Z. S. Raumliche Tragwerke aus Stahl. Düsseldorf, 1963.
7. 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>
8. Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "Space frame". Encyclopedia Britannica, Retrieved from: <http://surl.li/ogzxo>
9. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування
10. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. ПРОГИНИ І ПЕРЕМІЩЕННЯ Вимоги проектування
11. 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>
12. Мигнцковский М.Ш. Перекрестные фермы, Киев, 1960 г.
- 13 Kolodezhnov S.N. & Selivanova A.N. (2017). Analysis of suspended structural slab canopy reinforcement systems. Structural mechanics and structures, 14, 61-7
14. Huuybrechts 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)

15. 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>
16. Структурні плити конструкції ЦНІІСК. URL: <https://jak.bono.odessa.ua/articles/strukturni-pliti-konstrukcii-cniisk.php>
17. 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>
18. Flager, F., A. Adya, J. Haymaker and M. Fischer, 2014. *Computers and Structures*, 131, pp. 1-11.
19. Криштоп, Б.Г. Конструкції великопрогонових покриттів для загальних приміщень громадських будівель : навч. посіб. / Б.Г. Криштоп. — Київ : КНУБА, 2008. — 106 с.
20. 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>.
21. Davies, R. M. *Space Structures : A Study of Methods and Developments in Three-dimensional Construction* / R.M. Davies. — Chichester ; New York : Wiley, 1967. — 1233 p.
22. *Space Structures — Proceedings of the International Conference(s)*. In particular: *Space Structures 5* (постійні збірники доповідей міжнародних конференцій по просторових конструкціях) — (збірник матеріалів конференції, корисний для сучасних методів аналізу/моделювання та кейс-досліджень).

23. Flager, F., A. Adya, J. Haymaker and M. Fischer, 2014. Computers and Structures, 131, pp. 1-11.
24. Space Grid Structures : навч.-практ. довідник : електрон. ресурс. — Без автора. — Без місця вид., без видавця, без дати. — Електронний підручник, що містить огляд технологій і конструктивних схем просторових двошарових ґраток (space frames), приклади розрахунків та конструктивних вузлів
25. Кагановський Л.О. Нові рішення вузлових з'єднань стрижнів структурних та одношарових решітчастих конструкцій / Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. –Випуск 5, 2010 р.192 с.
26. ДСТУ 8943:2019 — «Труби сталеві електрозварні. Технічні умови»
27. Roof Truss Guide : design and construction of standard timber and steel trusses : practical guide / GTZ. — Без місця вид., без видавця, без дати. — Практичні рекомендації та розрахункові приклади для ферм і стержневих покриттів

ДОДАТКИ

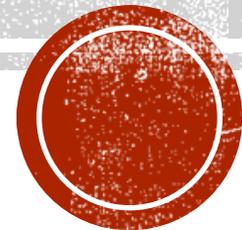
Сумський НАУ
Кафедра будівельних конструкцій

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТРУКТУРНОЇ ОБОЛОНКИ

Студент: Бурик В.В.

Група БУД 2401 м , курс 2м

Керівник: к.т.н., доцент Срібняк Н.М.



АПРОБАЦІЯ РОБОТИ

- Бурик В.В. Аналіз напружено-деформованого стану стержньових оболонок. // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

- Структурні великопрольотні плити покриття є універсальними, ефективними та формуються повторенням базового елемента-кристалу, що надає їм кристалічну будову, подібну до графіту чи алмазу.
- Такі плити можуть бути плоскими або криволінійними (сферичними, циліндричними, гіперболічними).
- Для їх виготовлення застосовують сталь, алюміній або деревину, а в Україні найчастіше використовують армоцементні елементи регулярної структури.



МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

- знайти такий варіант структурної металевої плити, який потребує найменшої витрати матеріалу. Усі рішення, що порівнюються, відрізняються між собою тільки кількістю колон і схемою їх розташування відносно прямокутної в плані плити.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Вивчити основи формування структурної стрижневої просторової плити, розглянути особливості роботи різних її типів та порівняти їх між собою.
2. Визначити й проаналізувати чинники, що впливають на напружено-деформований стан таких конструкцій.
3. Створити в ПК Ліра-САПР скінченоелементні моделі плит однакових розмірів, геометрії, граничних умов та навантажень, які відрізняються лише кількістю та розташуванням опорних стійок.
4. Провести статичний і конструктивний розрахунок трьох варіантів плит в ПК Ліра-САПР.



ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

- **5.** Оцінити напружено-деформований стан цих моделей, включно з внутрішніми зусиллями, переміщеннями вузлів та загальною стійкістю.
- **6.** Оцінити ступінь використання перерізів стержнів за жорсткостями, що призначені у вихідних даних.
- **7.** Виконати підбір нових перерізів у модулі «Метал» Ліра-САПР 2024 для кожної схеми згідно вимог норм проектування
- **8.** Визначити вагу всіх конструктивних варіантів й вибрати той, який потребує найменшого об'єму матеріалу.



Об'єкт дослідження – структурні просторові стержньові плити покриття розміром в плані 36,0 x24,0 м, які мають різну кількість опор та різну їх локалізацію при незмінності інших геометричних параметрів та фізико-механічних характеристик матеріалу.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан, конструктивне вирішення, матеріалоємність трьох конструктивних схем стержньових просторових плит.

Практичне значення отриманих результатів

Отримані результати дозволяють, спираючись на статичний розрахунок, визначити нові жорсткості стрижнів конструкції — підібрати інші перерізи та розрахувати вагу кожної з розглянутих моделей.



МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

- **Скінченоелементне моделювання** (ПК Ліра-САПР): створено моделі плит з різною кількістю та розташуванням колон для дослідження напружено-деформованого стану, внутрішніх зусиль, переміщень та стійкості.
- **Статичний розрахунок:** визначено максимальні осьові та згинальні зусилля, прогини і моменти для оцінки ефективності схем опор та роботи елементів.
- **Оптимізаційний підбір перерізів** (модуль «Метал», Ліра-САПР 2024): визначено оптимальні розміри стержнів без втрати жорсткості та стійкості.
- **Порівняльний аналіз:** оцінено матеріалоемність, вагу плит, ступінь використання перерізів і рівномірність роботи стержнів для вибору найбільш ефективної конструктивної схеми.



АЛГОРИТМ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Створення SE моделей
стержньових просторових плит

↓

Модель №1

Модель №2

↓

Модель №3

↓

Статичний розрахунок моделей (НДС,
стійкість)

↓

Конструювання
моделі №1

↓

Конструювання
моделі №2

↓

Конструювання
моделі №3

↓

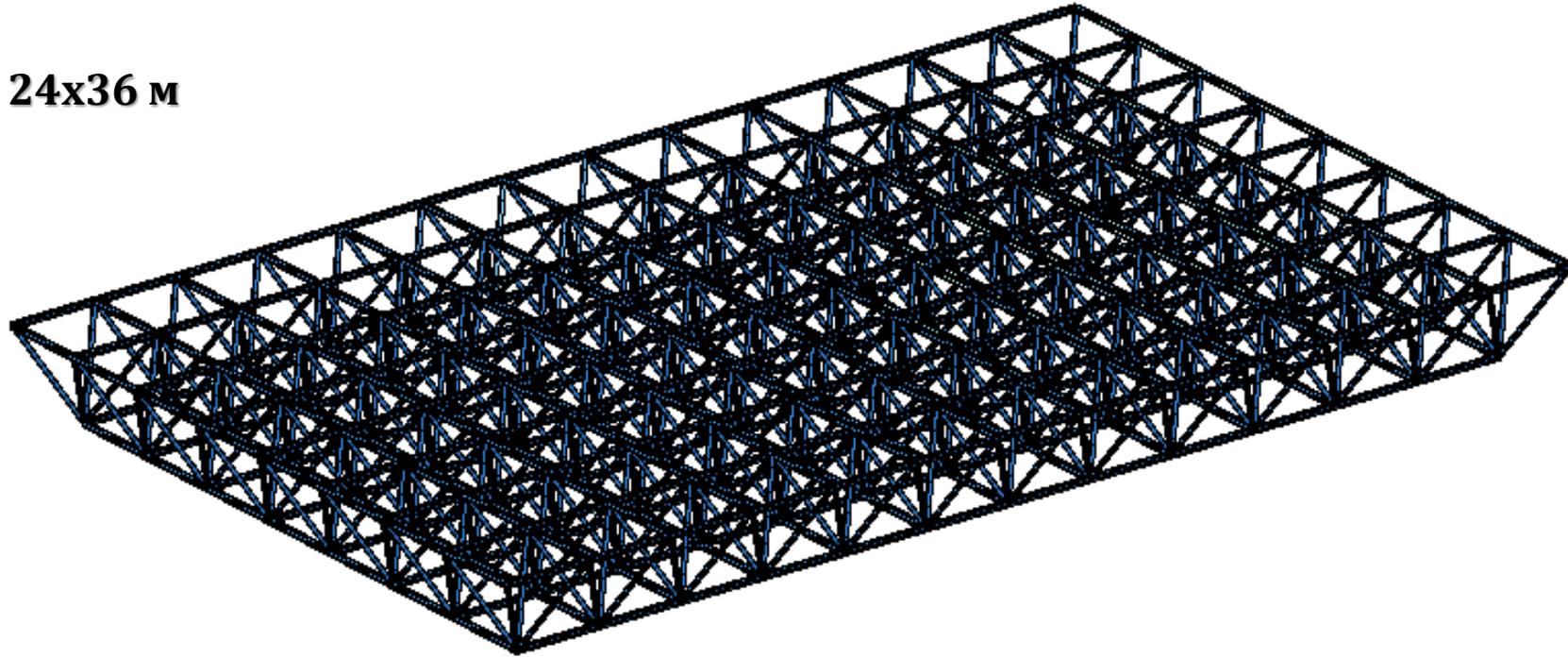
Обчислення ваги кожної моделі та
визначення найлегшої



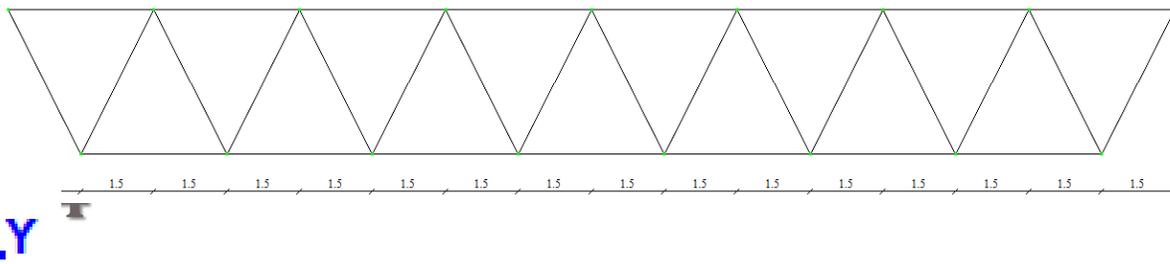
ГЕОМЕТРІЯ ПЛИТИ, ЩО ДОСЛІДЖУЮТЬСЯ

Просторова модель

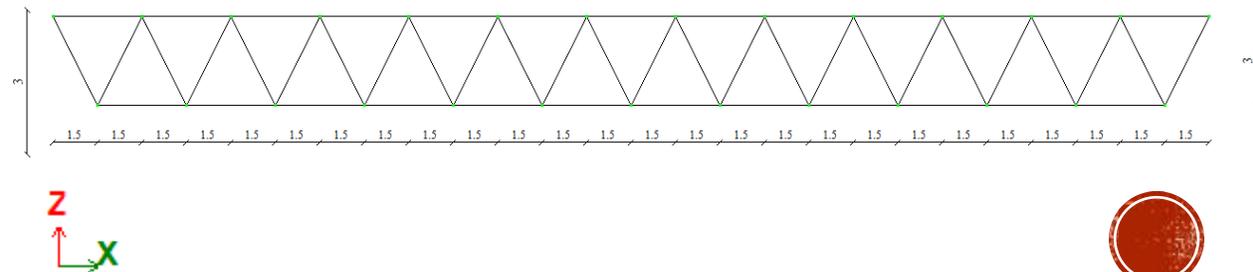
Плита в плані 24x36 м
Висота: 3,0 м



Вид збоку (площина XOY)



Вид збоку (площина XOZ)



ПРОСТОРОВІ МОДЕЛІ ПЛИТ

схема 1 (колони по чотирьом кутах нижнього пояса)

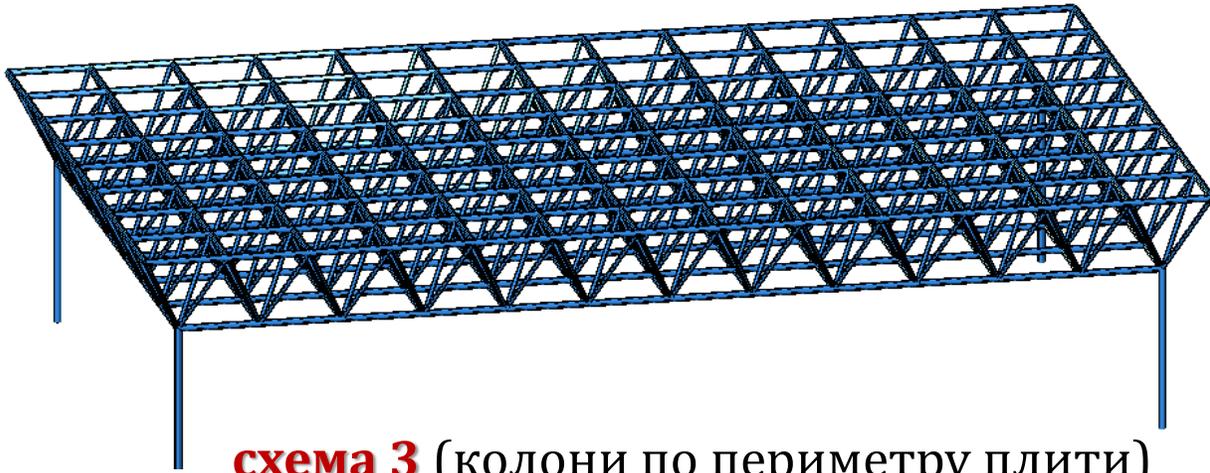


схема 2 (колони по довгим сторонам)

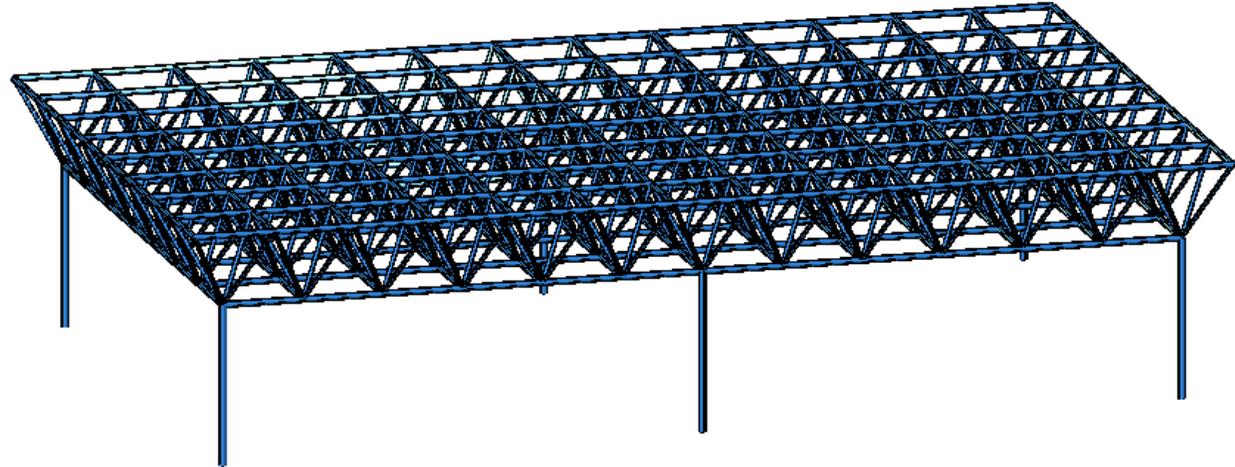
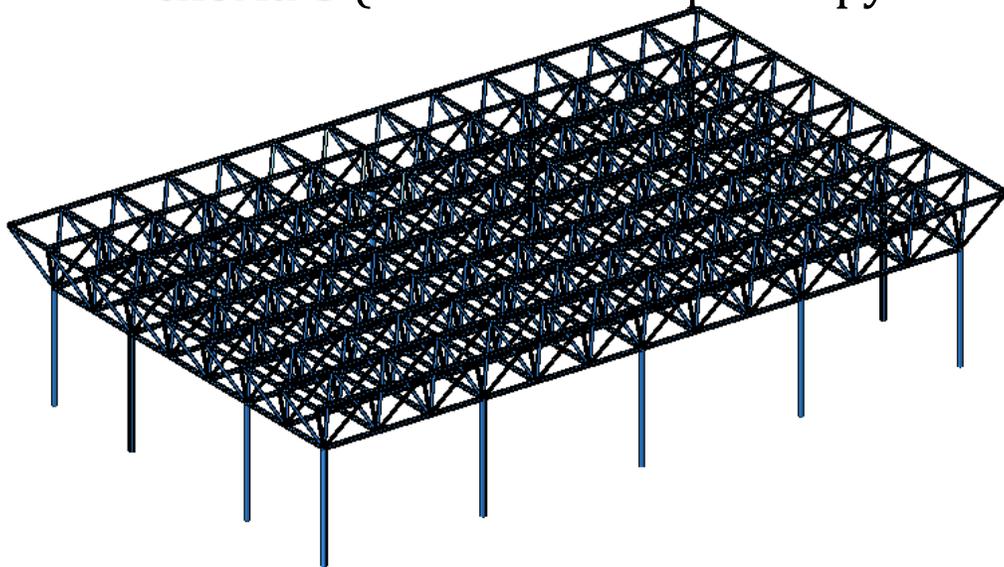


схема 3 (колони по периметру плити)



ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ МОДЕЛЕЙ

Модель №1 — це прямокутна стержньова плита, оперта лише на чотири кутові колони. Плита працює як просторова решітчаста система з домінуванням осьових зусиль у стержнях, де навантаження передається через розтяг і стиск. Відсутність проміжних опор створює велику «вільну» прольотну область, що забезпечує мембранну та оболонкову роботу конструкції.

Діагональні стержні несуть основне навантаження і відіграють ключову роль у міцності та стійкості. Характерні особливості: велика просторовість взаємодії елементів, висока чутливість до геометричних деформацій та нерівномірного навантаження, а також ефективний багатовекторний перерозподіл зусиль.

Модель №2 — це просторово-підперта (багатопролітна) плита з нерівномірним контурним обпиранням та точковими опорами. Плита працює у просторовому, просторово-напруженому режимі, оскільки точкові опори (колони), розташовані вздовж довгих сторін, формують складний просторовий перерозподіл зусиль. У напрямку довгої сторони наявність трьох опор створює кілька прольотів, що фактично утворюють двопролітну робочу схему. У поперечному напрямку плита функціонує як нерегулярно оперта конструкція, що зумовлено різною висотою та положенням вузлів обпирання.



Модель №3 — Це прямокутна стержньова плита, оперта на колони по периметру, яка працює як просторова система з передачею навантаження через взаємопов'язані стержні. Завдяки замкненій контурній рамі забезпечується висока просторова жорсткість. Основними є осьові зусилля розтягу і стиску, що дозволяють ефективно перерозподіляти навантаження між колонними вузлами та внутрішньою частиною сітки. Плита функціонує як багатопролітна решітчаста система з комбінованою роботою згину, мембрани та осьових сил. Внутрішня зона працює як просторові трикутні та квадратні комірки, що рівномірно передають навантаження на контур, зменшують локальні деформації і підвищують стійкість конструкції. Основні характеристики: виражена просторовість, домінування осьових зусиль та ефективний багатовекторний перерозподіл навантаження

Відстань між колонами та їх кількість

№ схем и	Відстань між колонами по осі X, м	Відстань між колонами по осі Y, м	Кількість колон по осі X, м	Кількість колон по осі Y, м
1	36	21	2	2
2	18	21	3	2
3	9	6/9	5	4

Матеріали для структури

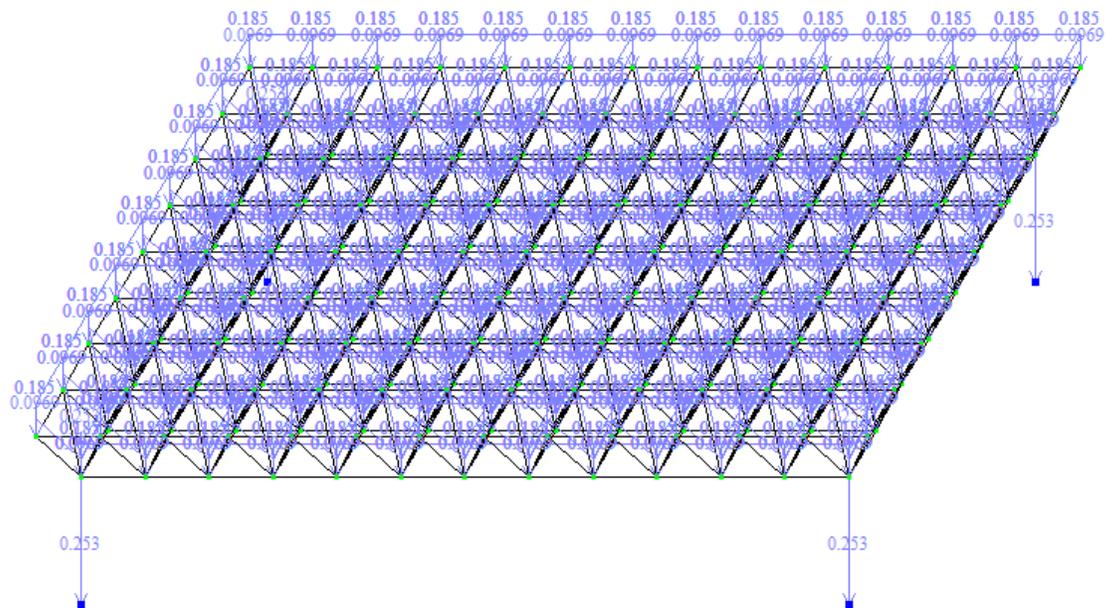
Всі елементи просторової плити прийняті із сталі будівельної. Прийнято профілі трубчатого перерізу із сталі класу С235 з характеристиками: $R_y = 240 \text{ Па} = 24,0 \text{ кН/см}^2$, $R_{yn} = 245 \text{ Па} = 24,5 \text{ кН/см}^2$, $E = 2,06 \cdot 10^8 \text{ кН/см}^2$, $\gamma = 77,0085 \text{ кН/м}^3$, $\mu = 0.3$

Граничні умови

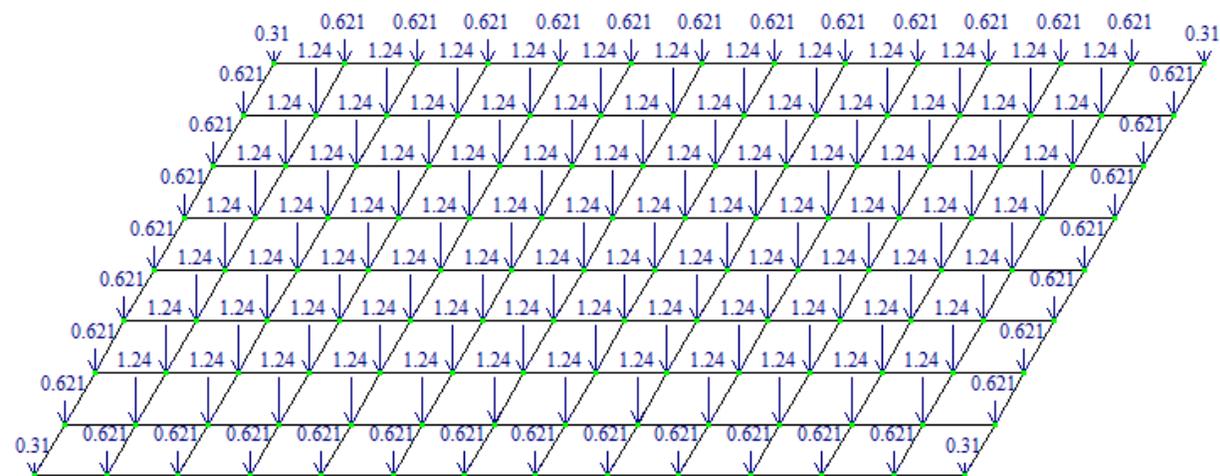
Структура спирається шарнірно на колони. Кріплення в узлах структури передбачається шарнірним.



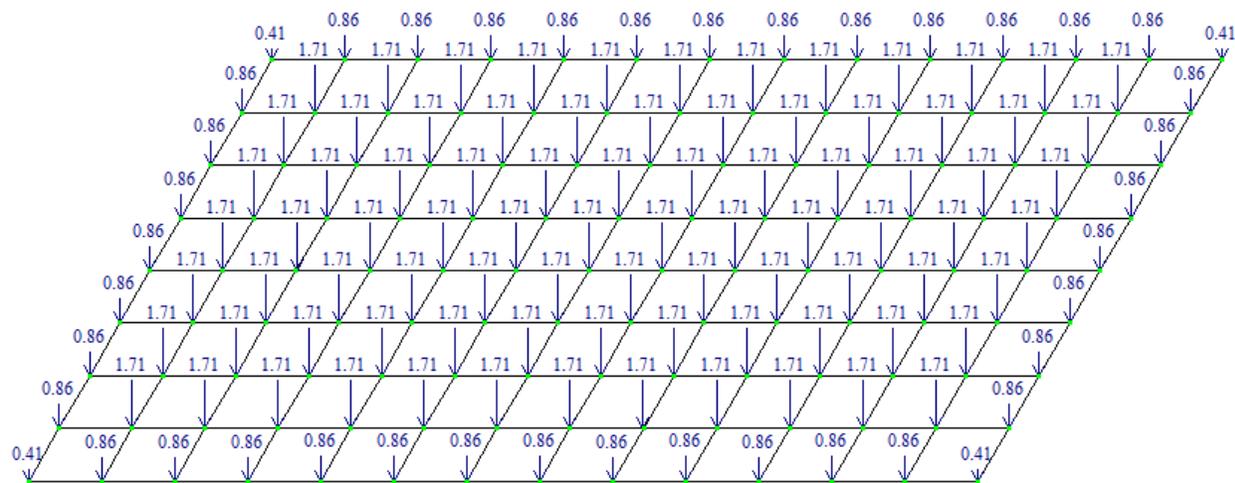
Завантаження 1. Власна вага конструкції



Завантаження 2. Вага покриття



Завантаження 3. Сніг



Вітрове навантаження на конструкцію не враховується, так як зусилля від вітрового навантаження становлять приблизно 1% та їх вплив на напружено-деформований стан конструкції є несуттєвим [1].

Для міста Суми снігове навантаження становить $1,64 \text{ кН/м}^2$. Прийнято рівномірний розподіл снігового покриття по всьому покриттю оскільки ухил верхнього поясу плити є меншим за 30° [1].

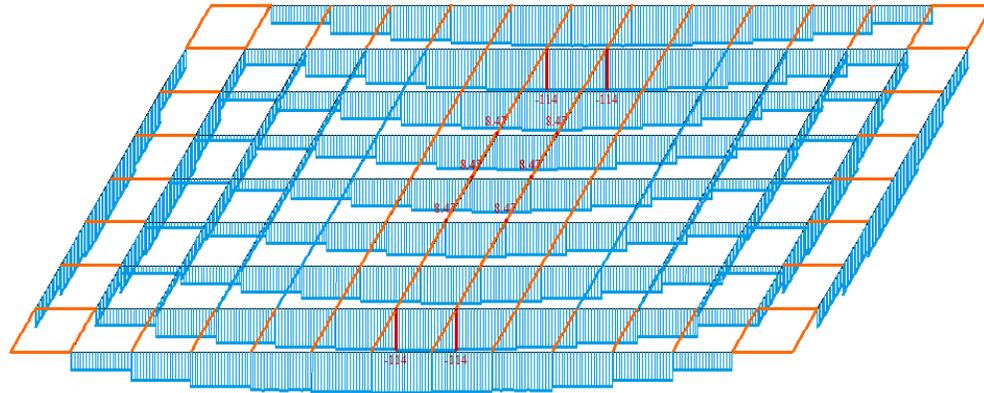
Схеми завантаження скінченоелементної моделі плити трьома типами завантажень: від власної ваги елементів; від ваги покриття; від снігового навантаження

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Епюри осьових зусиль N від РСН2 для верхнього поясу

Схема №1

(N max=-113,6 т; N max= +8,5 т)

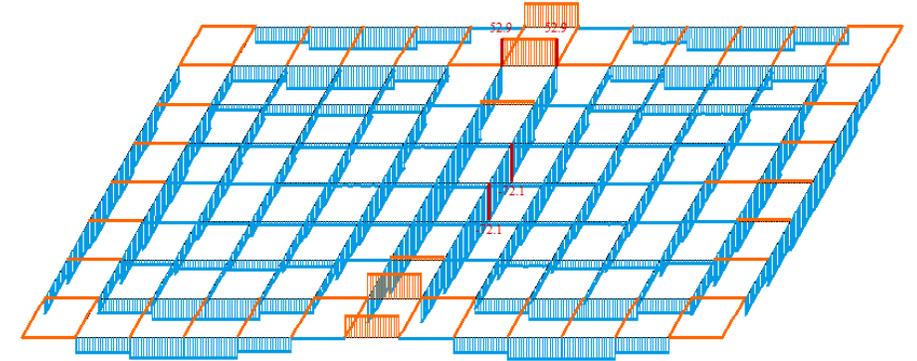


2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Епюра N
Единиці вимірювання - т

Отм.+ 3.000
Минимальное значение -113.629; Максимальное значение 8.46582

Схема №2

N max=-72,13 т; N max= +52,9 т

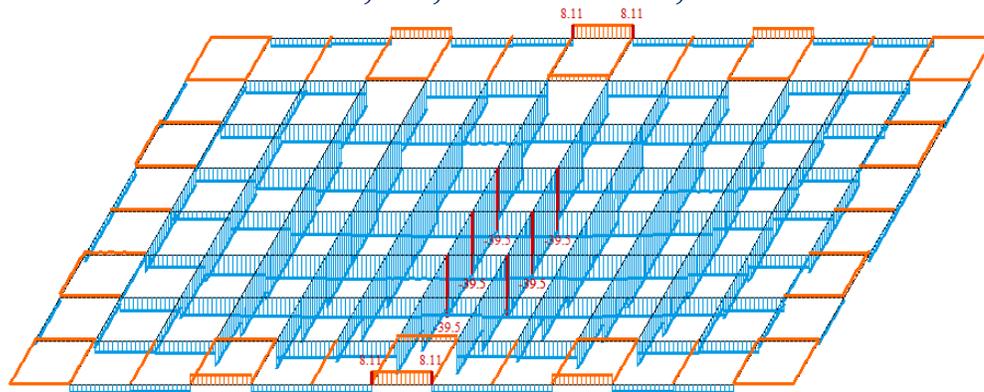


2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Епюра N
Единиці вимірювання - т

Отм.+ 3.000
Минимальное значение -72.1374; Максимальное значение 52.9286

Схема №3

N max=-39,5 т; N max= +8,11 т



2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Епюра N
Единиці вимірювання - т

Отм.+ 3.000
Минимальное значение -39.5354; Максимальное значение 8.11087

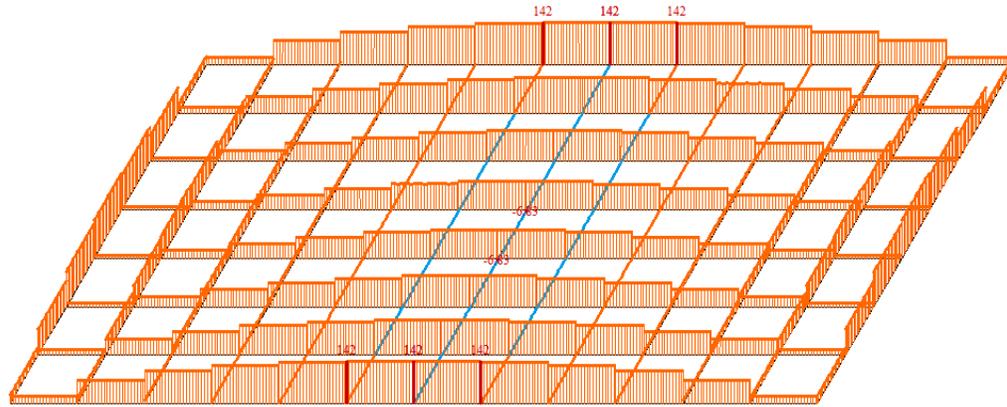
Елементи верхнього поясу працюють переважно в умовах стиску, тоді як нижній пояс сприймає розтяг. Відповідні епюри подано на рис. 5.1–5.2. Розкоси мають змінний характер осьових зусиль N, тобто можуть переходити від роботи на розтяг до роботи на стиск і навпаки.



Епюри осьових зусиль N від РСН2 для нижнього поясу

Схема №1

$N_{max}=142,3 \text{ т}$; $N_{max}=-6,83 \text{ т}$



2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Эпюра N
Единицы измерения - т

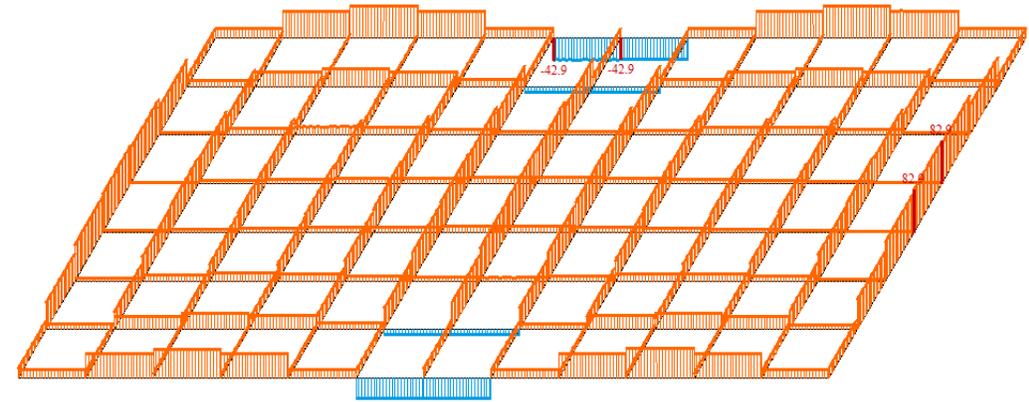


Отм. 0.000

Минимальное значение -6.83121; Максимальное значение 142.231

Схема №2

$(N_{max}=82,9 \text{ т}; N_{max}=-42,92 \text{ т})$



2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Эпюра N
Единицы измерения - т

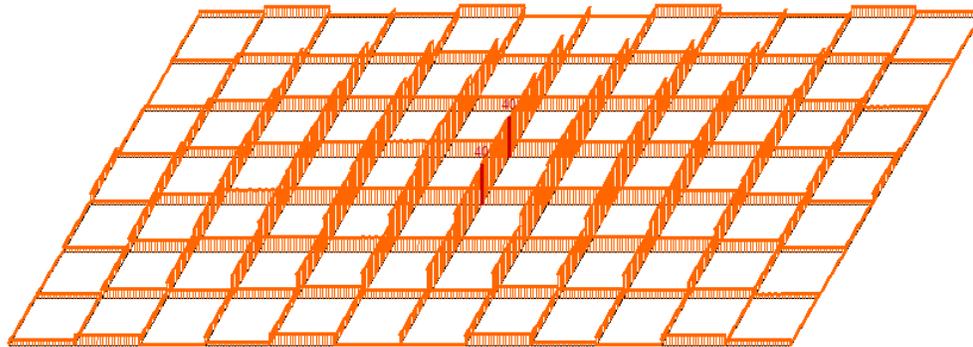


Отм. 0.000

Минимальное значение -42.9197; Максимальное значение 82.9042

Схема №3

$N_{max}=39,99 \text{ т}$; $N_{max}=0$



2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006_1)
Эпюра N
Единицы измерения - т



Отм. 0.000

Максимальное значение 39.9883



Мозаїка осьових зусиль N від РСН2 для стержней решітки структурних плит

Схема №1

$N_{max}=+61,5$; $N_{max}=-72,4$ т

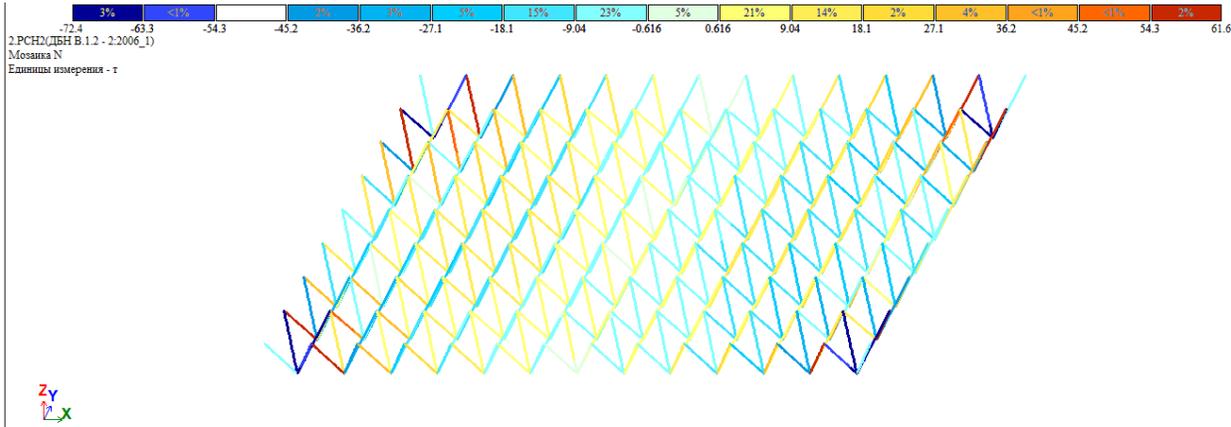


Схема №2

$N_{max}=+55,8$; $N_{max}=-87,5$ т

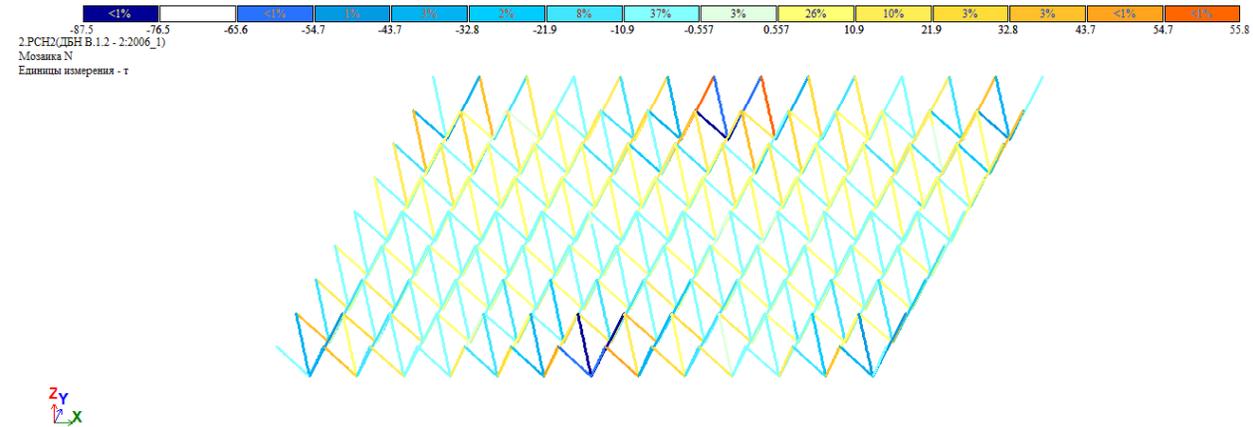
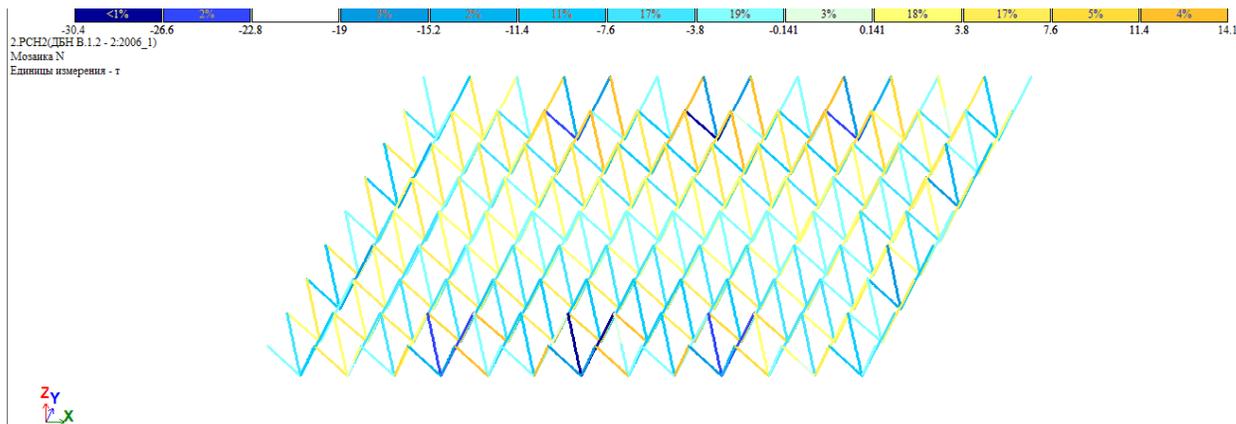


Схема №3

$N_{max}=+14,1$ т; $N_{max}=-30,4$ т



Епюри осьових зусиль N від РСН2 для колон структурних плит

Схема №1
($N_{max} = -173$ т)

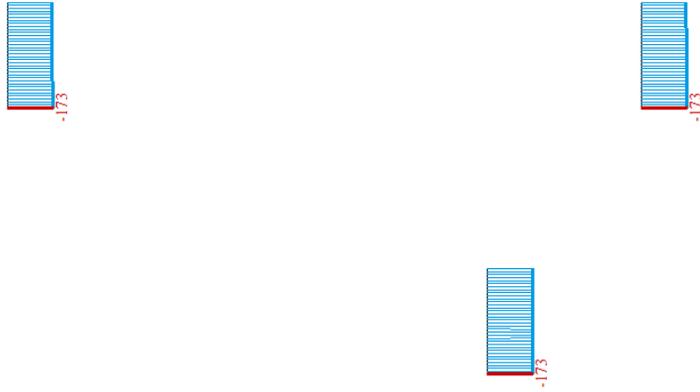


Схема №2
 $N_{max} = -254$ т

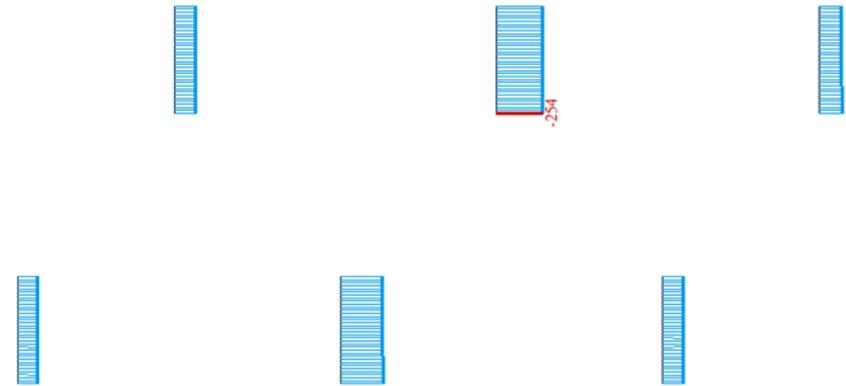
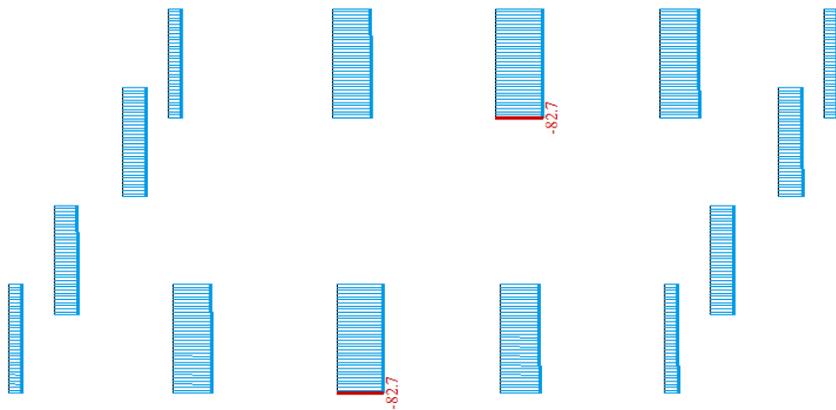


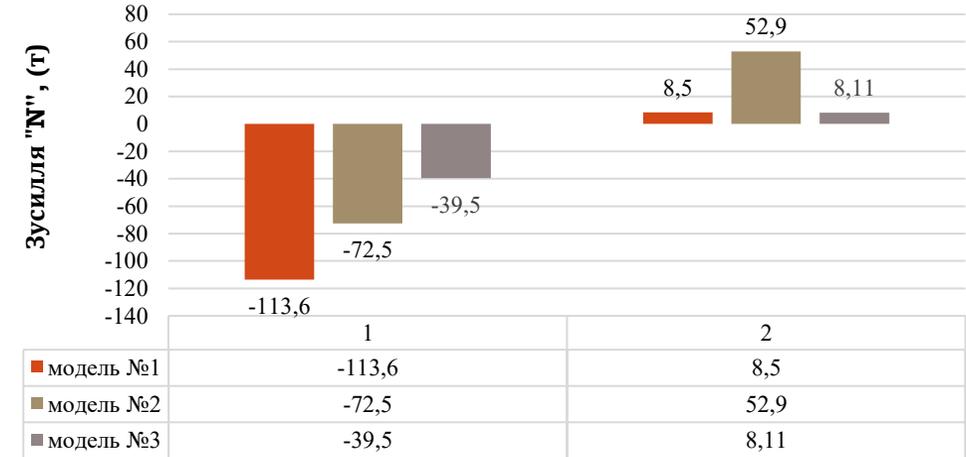
Схема №3
($N_{max} = -82,7$ т)



Максимальні зусилля N в поясах структури від РСН 2

№ схеми	Верхній пояс		Нижній пояс		Розкоси	
	Стиск	Розтяг	Стиск	Розтяг	Стиск	Розтяг
1	-113,6	8,5	-6,83	142,3	-72,4	61,5
2	-72,5	52,9	-42,92	82,9	-87,5	55,8
3	-39,5	8,11	0	39,9	-30,4	14,1

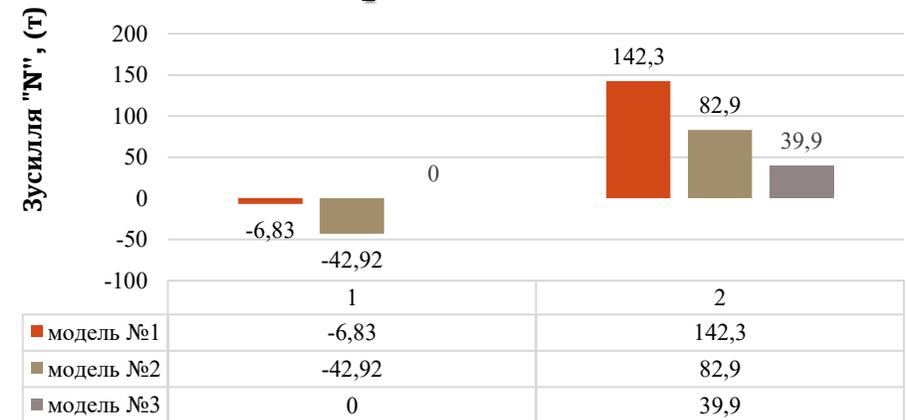
Зусилля "N" у верхньому поясі



Зусилля "N" у нижньому поясі

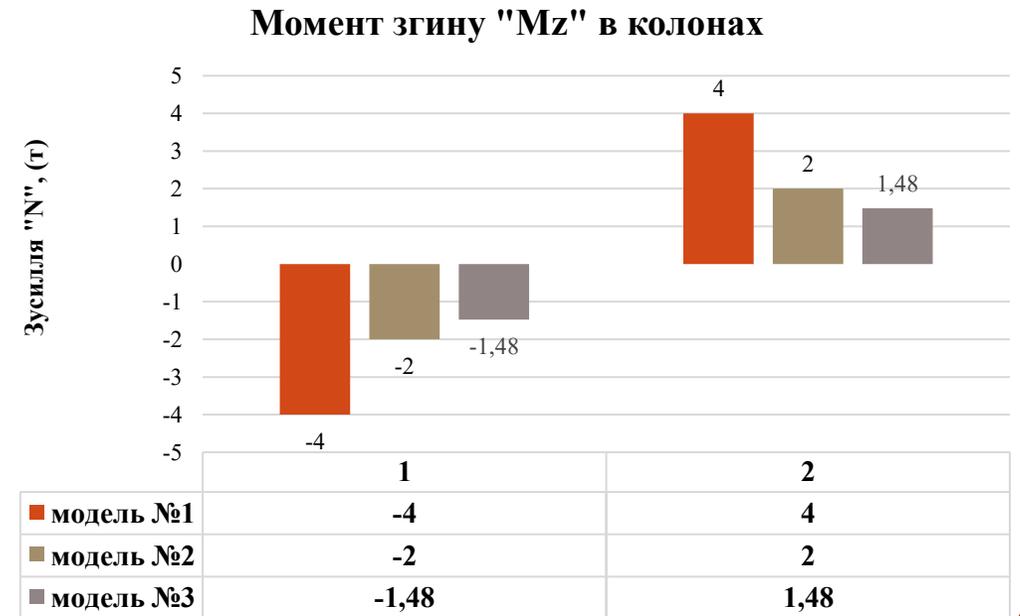
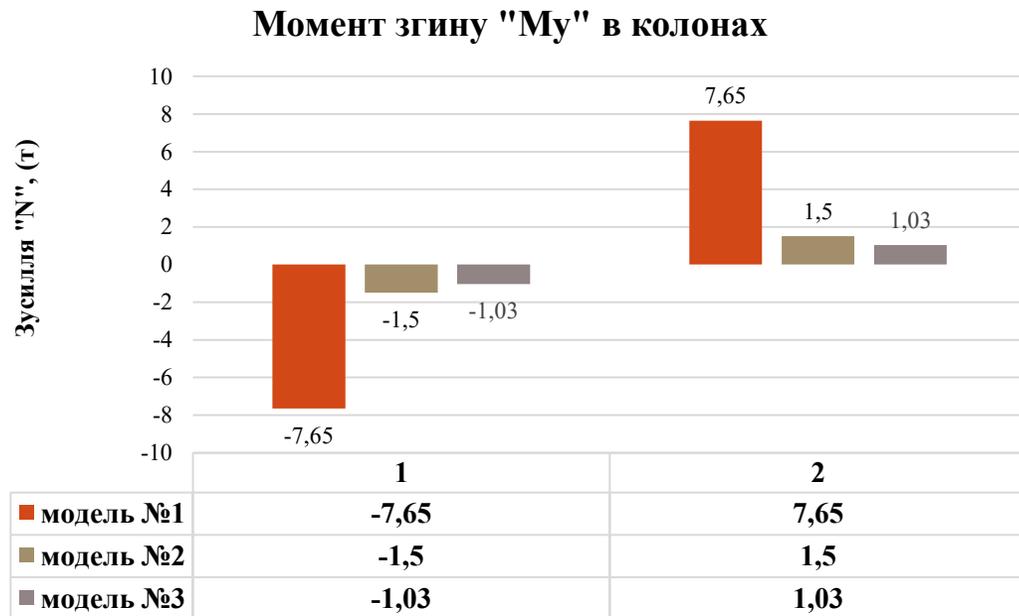
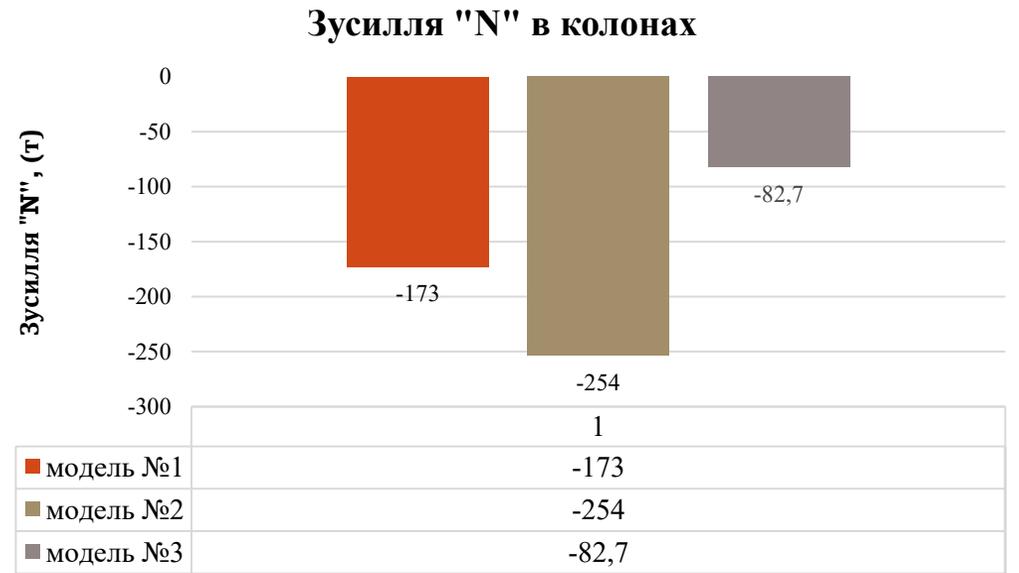


Зусилля "N" у стержнях решітки



Максимальні зусилля N в колонах моделей від РСН 2

№ схем и	N, [т]	My, [т·м]		Mz, [т·м]	
1	-173	-7,65	7,65	-4,0	4,0
2	-254	-1,5	1,5	-2,0	2,0
3	-82,7	-1,03	1,03	-1,48	1,48



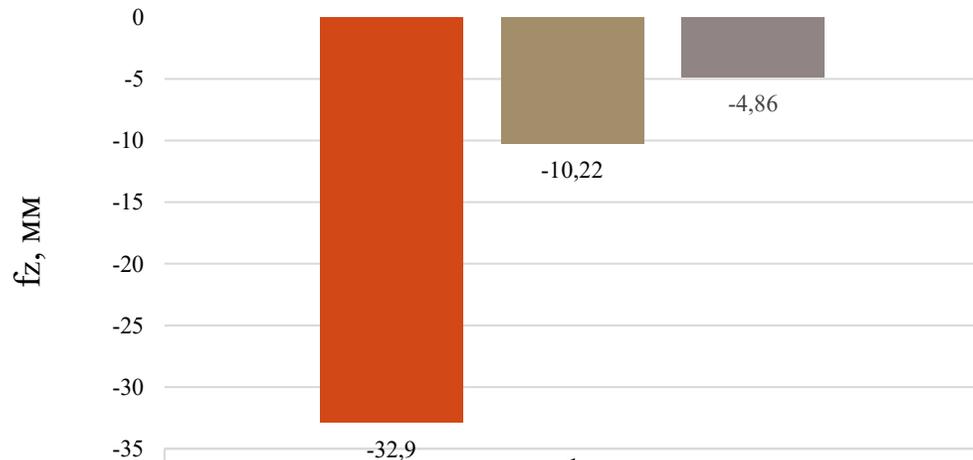
АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

Деформативність моделей плит, що досліджуються

Максимальні переміщення f_z

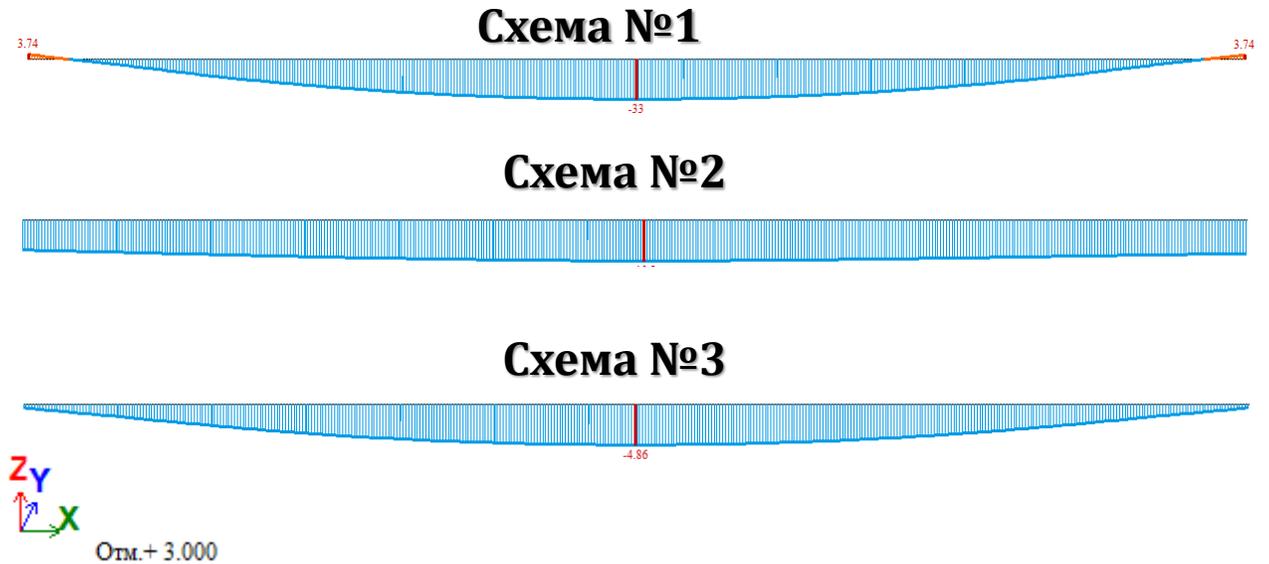
f_z , [мм]		
Схема №1	Схема №2	Схема №3
-32,9	-10,22	-4,86

Переміщення f_z , max (мм)

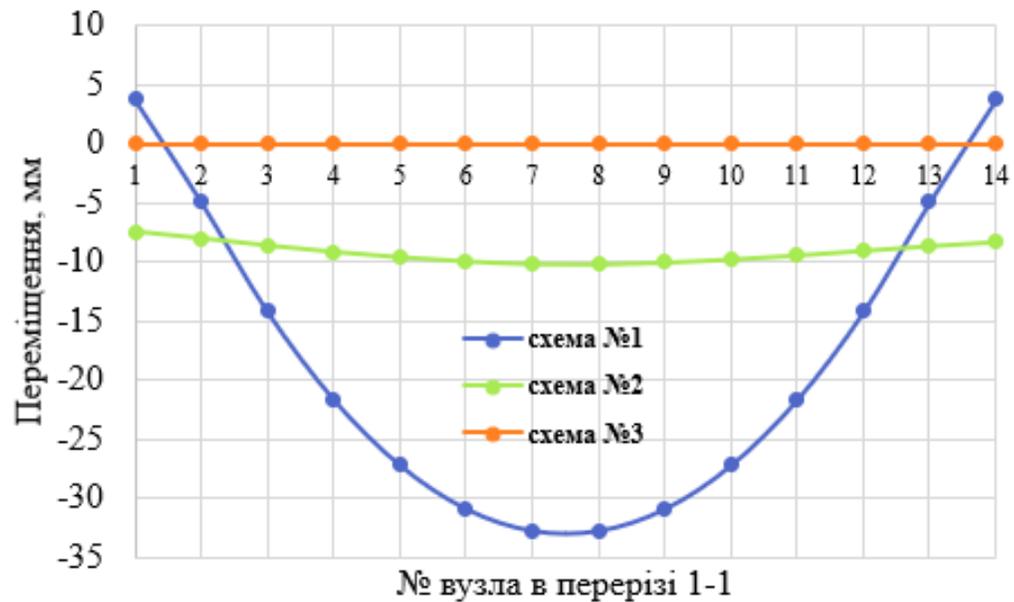


■ модель №1	-32,9
■ модель №2	-10,22
■ модель №3	-4,86

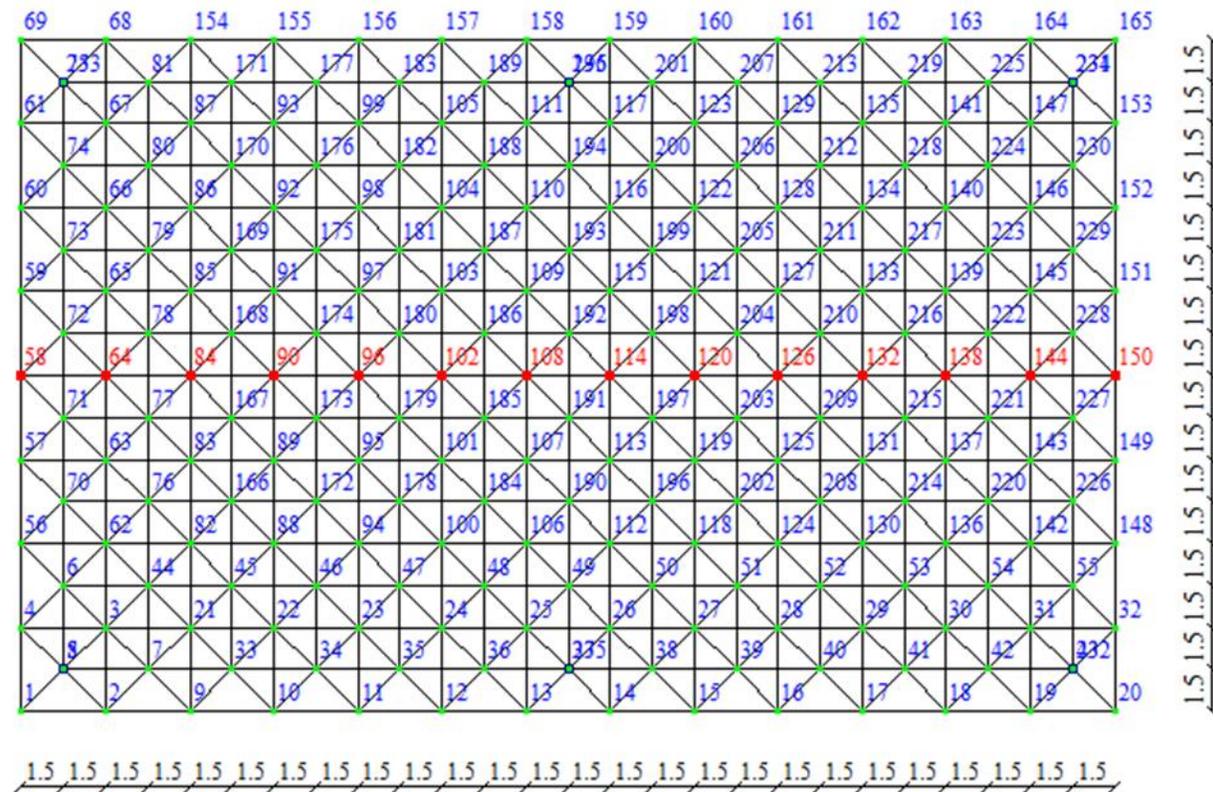
Епюра максимальних прогинів f_z в площині XOZ стержня верхнього поясу для схем від РСН 2



Графіки прогинів по вертикалі в узлах структури в її поперечному перерізі 1-1 від РСН2

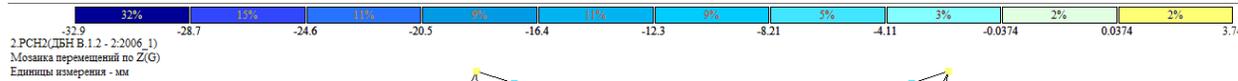


Поперечний переріз 1-1, в якому досліджуються прогини конструкції (на прикладі моделі №2)



МОЗАЇКА ПЕРЕМІЩЕНЬ ВУЗЛІВ ПО ОСІ Z ТА ДЕФОРМОВАНА СХЕМА ВІД РСН2

Схема №1



2 РСН2(ДН В.1.2 - 2:2006_1)
Мозаїка переміщень по Z(G)
Единиці вимірювання - мм

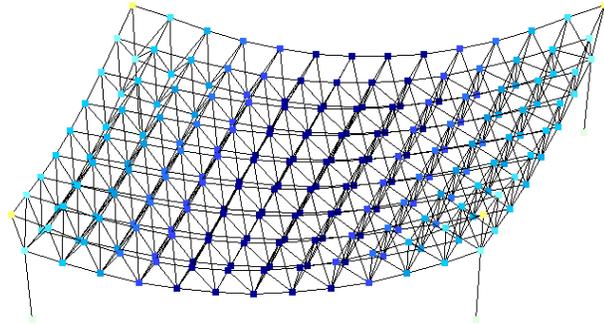
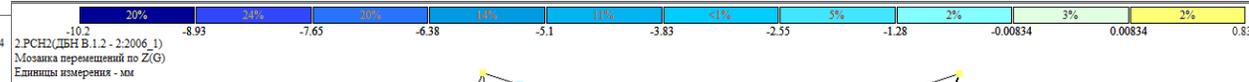


Схема №2



2 РСН2(ДН В.1.2 - 2:2006_1)
Мозаїка переміщень по Z(G)
Единиці вимірювання - мм

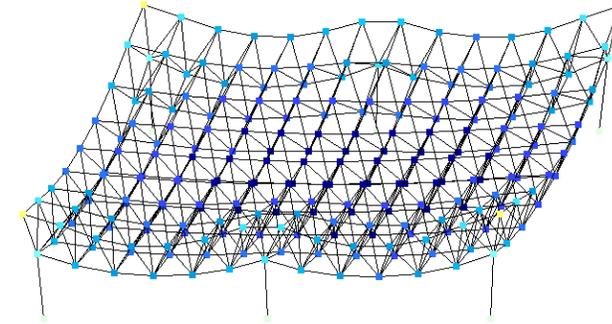
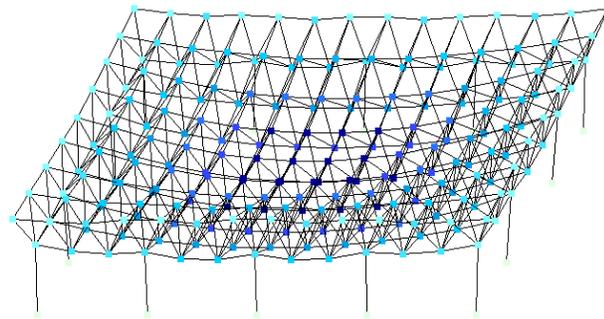


Схема №3



2 РСН2(ДН В.1.2 - 2:2006_1)
Мозаїка переміщень по Z(G)
Единиці вимірювання - мм



Гранично допустимі прогини для трьох моделей плит визначені за формулою згідно норм [10].

Схема №1. Для плити як чотириточкової опорної системи (схема №1):

$$f = \frac{L}{250} = \frac{36000}{250} = 144 \text{ мм} \quad (1)$$

Схема №2. Для перевірки вертикальних переміщень у моделі №2 як груповий (ефективний) проліт слід приймати відстань в 18,0 м між суміжними опорними стійками вздовж напрямку, що розглядається (це крок колон по довгій стороні).

$$f = \frac{L}{250} = \frac{18000}{250} = 72 \text{ мм} \quad (2)$$

Схема №3. За розрахунковий проліт доцільно приймати відстань між суміжними колонними осями (центр–центр), тобто 1,5 м у обох напрямках (уздовж і поперек плити). При периметральному розташуванні колон плита працює як сукупність малих панелей; локальні вигини і моменти визначаються відстанню між найближчими опорами, тому нормативні перевірки прогину виконують по цій відстані.

$$f = \frac{L}{250} = \frac{1500}{250} = 6 \text{ мм} \quad (3)$$

Висновок.

Деформативність усіх моделей перебуває в допустимих межах. Іншими словами, максимальні прогини від РСН2 не перевищують гранично допустимих значень, визначених формулами (1)–(3) відповідно до норм .



Стійкість моделей

Схема №1

$n = 19,14$

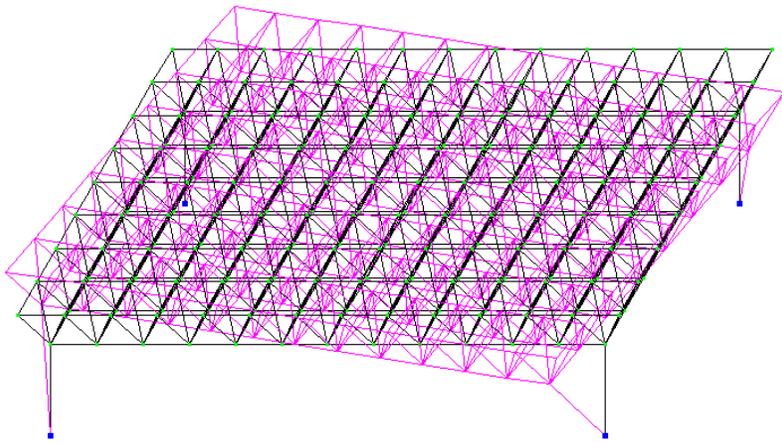


Схема №2

$n = 5,93$

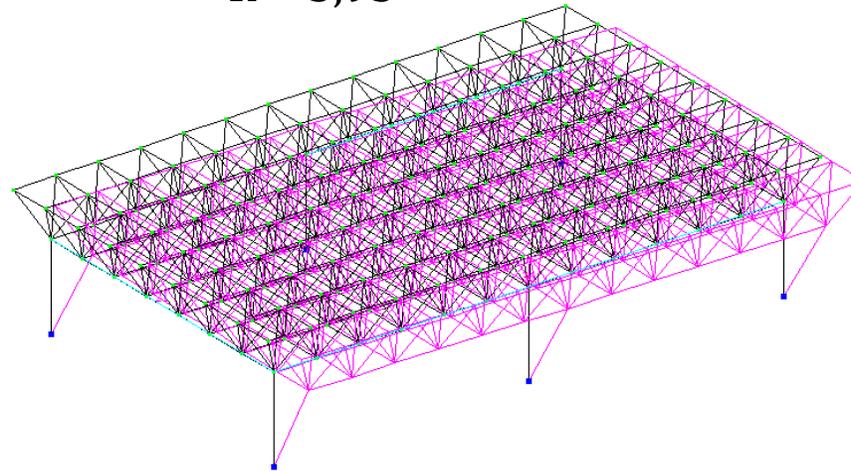
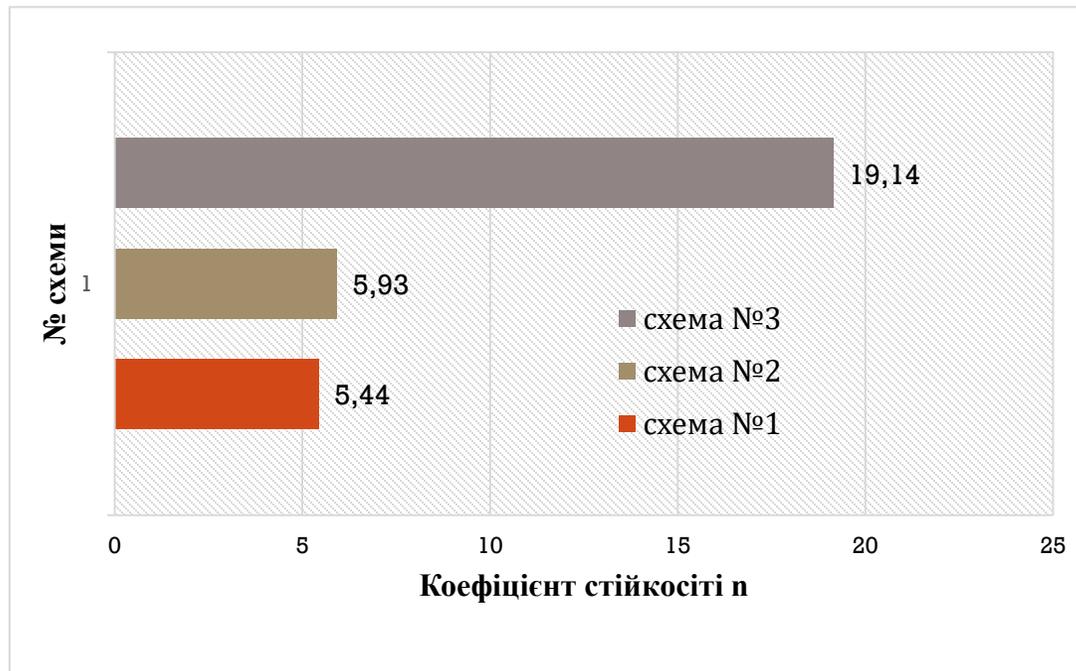
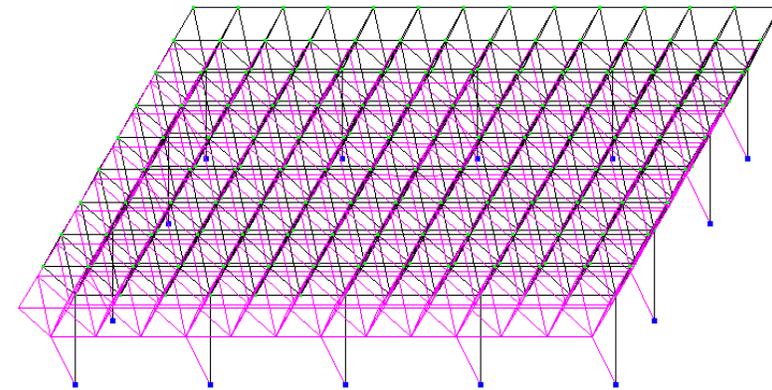


Схема №3

$n = 5,44$



Усі моделі мають достатню просторову стійкість ($n > 1$). Найнижче значення — у схеми №1, де стійкість мінімальна, але прийнятна. Схема №2 працює краще завдяки раціональнішій опорній схемі. Найвищу стійкість демонструє **схема №3** — її коефіцієнт майже втричі більший, що вказує на оптимальну просторову роботу та найефективніше обпирання.



Оцінка використання несучої здатності перерізів стержнів із жорсткостями, прийнятими у вихідних даних

Використання несучої здатності перерізу різними для різних груп стержнів конструкції плити

Назва конструктиву	Несуча здатність перерізу, %		
	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Верхній пояс	23,7	15	8,2
Нижній пояс	29,6	17,3	8,3
Розкоси	28,7	34,7	12,1
Стійки (колони)	51,8	47,4	16,9

Схема №3:

Найнижчі напруження у всіх групах стержнів, максимальний запас міцності й найвища стійкість. Робота конструкції найрівномірніша та найжорсткіша.

Схема №1:

Елементи працюють найнапруженіше й нерівномірно; найбільше завантажені нижній пояс, розкоси та стійки. Запас міцності мінімальний, але матеріал використовується найефективніше.

Схема №2:

Конструкція працює рівномірніше; більшість елементів мають помірно навантаження, а розкоси — підвищене. Запас міцності більший, стійкість краща, ніж у схеми №1.

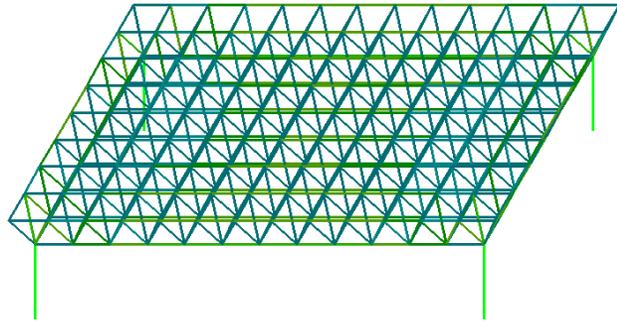


Мозаїка результатів розрахунку за 1ю групою граничних станів сталевих елементів з поперечними перерізами , призначеним в вихідних даних, % несучої здатності

Схеми №1



Варіант конструювання: Варіант 1
Розрахунок по РСН,ДБН В.1.2 - 2:2006_1 (СНиП II-23-81*)

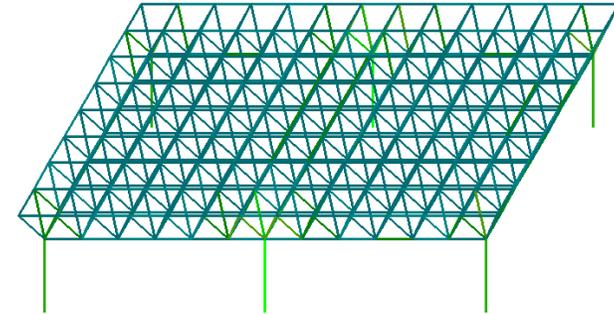


Мозаїка результатів перевірки назначених сечень по 1 предельному состоянию

Схеми №2



Варіант конструювання: Варіант 1
Розрахунок по РСН,ДБН В.1.2 - 2:2006_1 (СНиП II-23-81*)

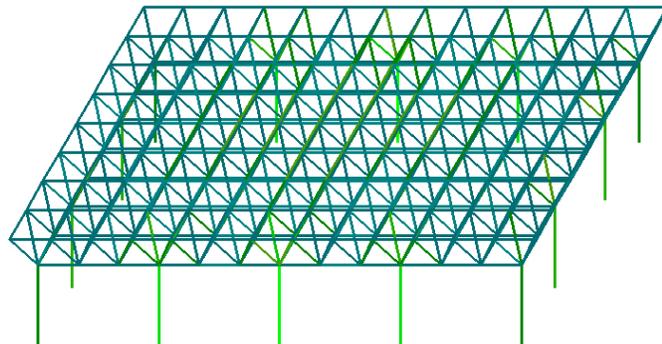


Мозаїка результатів перевірки назначених сечень по 1 предельному состоянию

Схеми №3



Варіант конструювання: Варіант 1
Розрахунок по РСН,ДБН В.1.2 - 2:2006_1 (СНиП II-23-81*)



Мозаїка результатів перевірки назначених сечень по 1 предельному состоянию



Підбір нових перерізів стержньових елементів в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР

Нові перерізи елементів структурних плит за варіантами

№ схеми	Переріз (профіль труби), прийнятий при першій ітерації	Переріз, підбраний ПК Ліра-САПР за результатами статичного розрахунку		
		№ типу перерізу в ПК Ліра-САПР	Сталь	Профіль труби
Верхній пояс				
1	ТБ 242x32	55	С 235	ТБ146x12
2	ТБ 242x32	139	С 235	ТБ 152x4,5
3	ТБ 242x32	77	С 235	ТБ 89x4,5
Нижній пояс				
1	ТБ 242x32	17	С 235	ТБ 203x7
2	ТБ 242x32	21	С 235	ТБ 180x5
3	ТБ 242x32	1	С 235	ТБ 102x4
Розкоси				
1	ТБ 168x25	21	С 235	ТБ 152x5,5
2	ТБ 168x25	238	С 235	ТБ 133x6
3	ТБ 168x25	118	С 235	ТБ 68x5,5

Колони				
1	ТБ 273x40	88,89,90,91	С 235	ТБ 377x10
2	ТБ 273x40	231	С 235	ТБ 299x7,5
		232	С 235	ТБ 299x8
		233	С 235	ТБ 325x7,5
		234	С 235	ТБ 377x11
		235	С 235	ТБ 426x9
		236	С 235	ТБ 299x7,5
3	ТБ 273x40	81,81,81	С 235	ТБ 133x4,5
		82,82,82,82	С 235	ТБ 194x5
		83,83,83,83	С 235	ТБ 203x6,5
		84, 84	С 235	ТБ 245x6,5
		85	С 235	ТБ 133x4,5



Підрахунок ваги стержнів верхнього поясу

№ схеми	№ типу перерізу	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	46	C235	ТБ146x12	0.03966	687	27,25
2	52	C235	ТБ 152x4,5	0.01637	687	11,25
3	24	C235	ТБ 89x4,5	0.00938	687	6,44

Підрахунок ваги стержнів нижнього поясу

№ схеми	№ типу перерізу	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	24	C235	ТБ 203x7	0.03384	561	18,98
2	24	C235	ТБ 180x5	0.02158	561	12,11
3	12	C235	ТБ 102x4	0.00967	561	5,42

Підрахунок ваги елементів решітки

№ схеми	№ типу перерізу	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	69	C235	ТБ 152x5,5	0.01987	1528,48	30,37
2	89	C235	ТБ 133x6	0.01879	1528,48	28,72
3	39	C235	ТБ 68x5,5	0.00848	1528,48	12,96

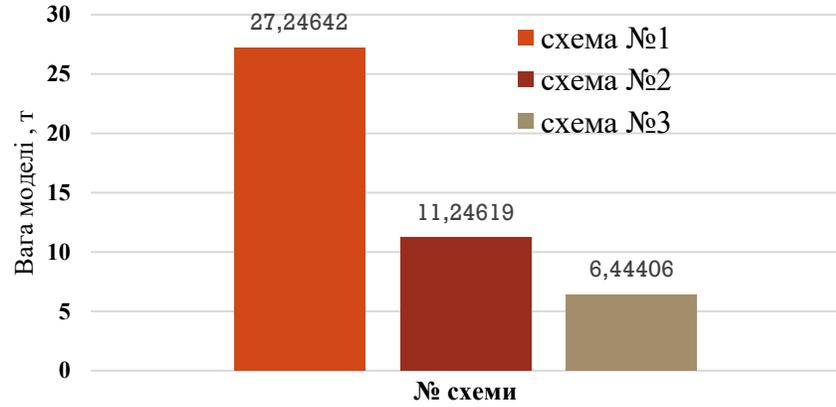
Підрахунок ваги колон

№ схеми	№ типу перерізу	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжин а, м	Кількість колон в моделі, шт	Загальна вага колон в моделі, т
1	88,89,90,91	C 235	ТБ 377x10	0.09051	6,0	4	2,17
2	231	C 235	ТБ 299x7,5	0.05392	6,0	1	0,32
	232	C 235	ТБ 299x8	0.05741	6,0	1	0,344
	233	C 235	ТБ 325x7,5	0.05873	6,0	1	0,35
	234	C 235	ТБ 377x11	0.09929	6,0	1	0,60
	235	C 235	ТБ 426x9	0.09255	6,0	1	0,56
	236	C 235	ТБ 299x7,5	0.05392	6,0	1	0,32
3	81,81,81	C 235	ТБ 133x4,5	0.01426	6,0	4	0,60
	82,82,82,82	C 235	ТБ 194x5	0.02331	6,0	4	0,56
	83,83,83,83	C 235	ТБ 203x6,5	0.03150	6,0	4	0,76
	84,84	C 235	ТБ 245x6,5	0.03823	6,0	2	0,46
	85	C 235	ТБ 133x4,5	0.01426	6,0	1	0,086

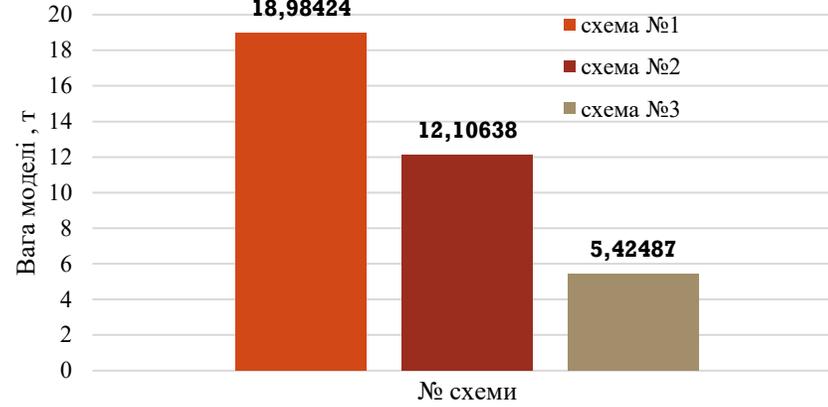
ПІДРАХУНОК ВАГИ ВСІЄЇ КОНСТРУКЦІЇ

№ схеми	Верхній пояс	Нижній пояс	Розкоси	Вага структурної плити	Колони	Всього вага, т	% структурної плити в загальній вазі моделі
1	27,25	18,98	30,37	76,60	2,17224	78,77	98,21
2	11,25	12,10	28,72	52,07	2,49492	54,56	95,43
3	6,44	5,42	12,96	24,83	2,202	26,95	92,15

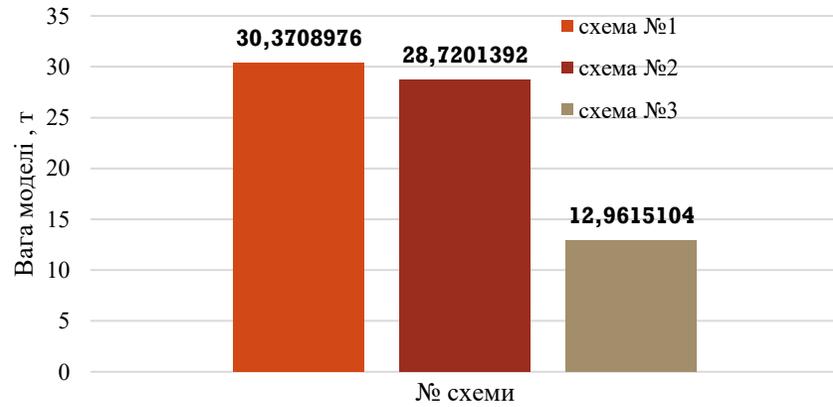
Вага стержнів верхнього поясу



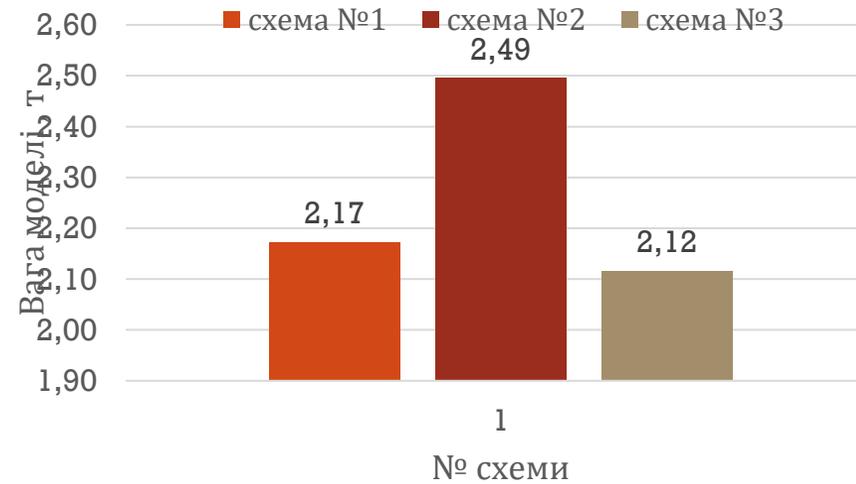
Вага стержнів нижнього поясу



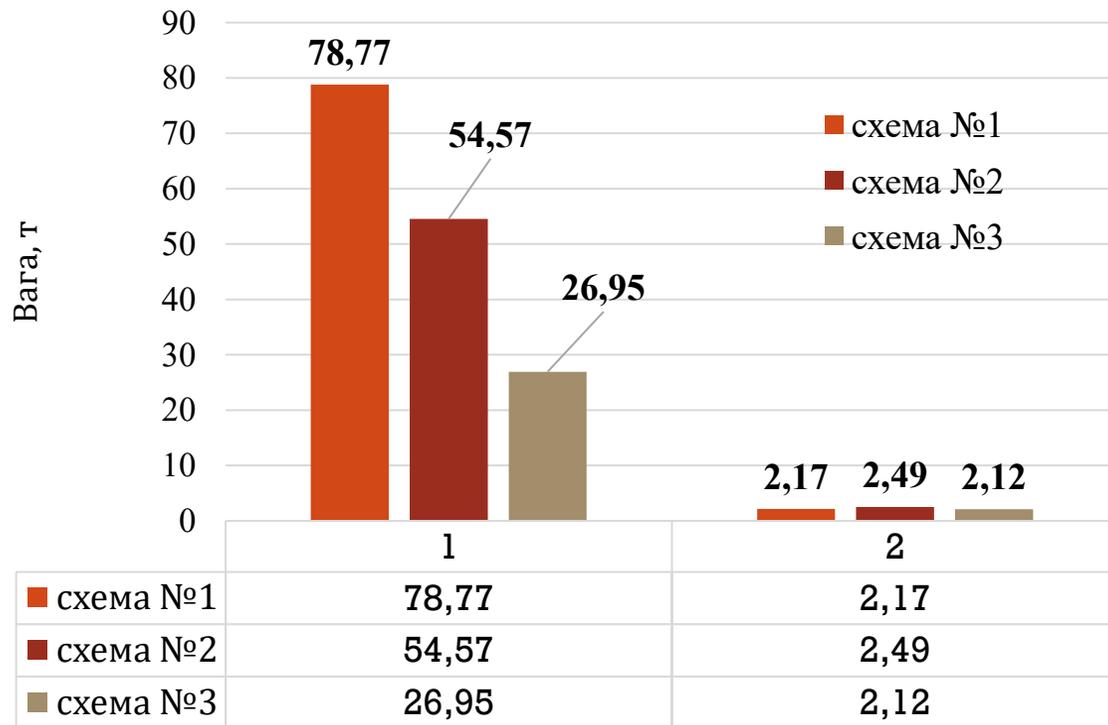
Вага стержнів решітки



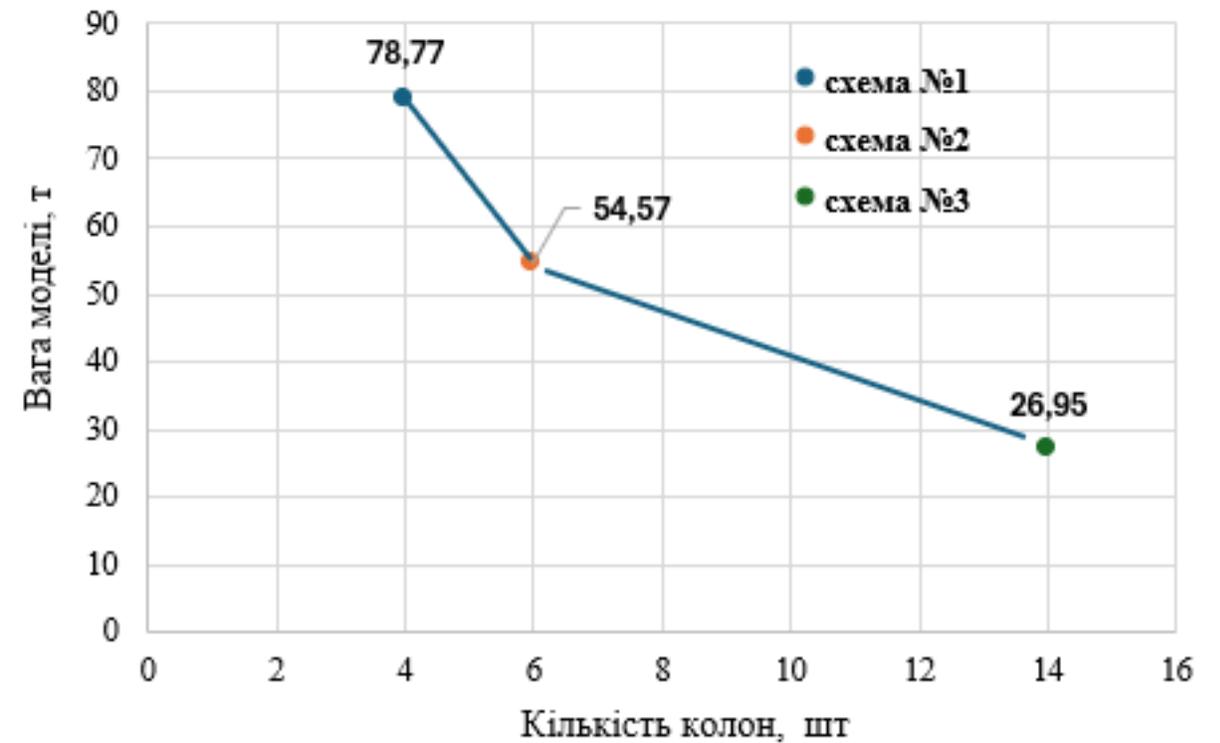
Вага колон



Загальна вага моделі та вага колон в складі моделі



Зміна ваги конструкції в залежності від кількості колон відповідно до варіантів їх розташування (1 варіант – 4 колони, 2 варіант – 6 колон , 3 варіант – 14 колон)



ВПЛИВ КОЛОН НА РОБОТУ СТЕРЖНЬОВОЇ ПЛИТИ

Зі збільшенням кількості колон вага конструкції зменшується. Зменшення ваги носить нелінійний характер.

Найбільше зменшення відбувається між 6 та 14 колонами, тобто введення додаткових колон у конструкцію дає суттєвий ефект.

Більша кількість колон забезпечує ефективніший розподіл навантаження, що дає змогу використовувати легші перекриття та елементи жорсткості, тому **загальна вага конструкції зменшується.**

Оптимальна кількість колон залежить від компромісу між вагою конструкції та функціональними вимогами.

Адже збільшення кількості колон зменшує вагу, але може ускладнювати планування та збільшувати вартість монтажу.



ВИСНОВКИ

- 1) Просторова стрижнева плита, форма якої наслідує геометрію природних кристалів, є високоефективним типом перекриття, здатним перекривати великі прольоти – від 12 до 36 метрів – без потреби в додаткових опорах.
- 2) Стержньово-плитна структурна система належить до таких будівельних конструкцій, які дуже чутливо реагують на зміну окремих параметрів. До таких параметрів відносять сукупність факторів, що помітно впливають на напружено-деформований стан плити. Їх також називають *регуляторами зусиль*.
- 3) Зміна навіть одного з цих параметрів, за умови незмінності решти, може суттєво трансформувати напружено-деформований стан конструкції. Так, варіювання стріли підйому (товщини плити), геометричної форми базового елемента або схеми обпирання (кількості та розташування опор) може значно змінити розподіл зусиль у стержнях. Іншими словами, ці фактори визначають характер перерозподілу зусиль за незмінних інших характеристик — планових розмірів конструкції, величини навантаження та попередньо прийнятої жорсткості системи.



- 4) Збільшення кількості опор у стержньово-плитній системі суттєво знижує та вирівнює осьові сили і моменти в поясах, розкосах та колонах. Перехід від схеми №1 до №2 і №3 приводить до закономірного перерозподілу навантажень: у поясах і розкосах зусилля зменшуються, а їхній розподіл стає рівномірнішим. У колонах зі збільшенням кількості опор різко зменшуються як осьові сили, так і згинальні моменти (M_y , M_z), що підтверджує ефективність багатоточкового обпирання та покращення роботи конструкції загалом.
- 5) Схема №1 з чотирма опорами є найменш жорсткою, тоді як схема №3 з периметральними опорами – найжорсткіша. Максимальні прогини зменшуються: у схемі №2 – в 3,22 раза, в схемі №3 – у 6,77 раза порівняно зі схемою №1. Прогин у схемі №3 в 2,10 раза менший, ніж у схемі №2. Криві прогинів підтверджують: схема №1 має значний центральний прогин, схема №2 – помірний, а схема №3 — майже рівномірну жорстку роботу плити. Розрахункові допустимі прогини для трьох схем становлять 144 мм, 72 мм та 6 мм відповідно дотримані, а отже деформативність всіх моделей знаходиться в межах норм.



- **6)** Усіх три моделі мають **достатню стійкість**, але схема №1 є найслабшою, схема №2 має трохи кращі характеристики, а схема №3 є найефективнішою, оскільки її коефіцієнт стійкості майже утричі більший, що забезпечує найвищий запас стійкості під дією РСН2.
- **7)** Аналізуючи результати розрахунку моделей із попередньо прийнятими жорсткостями, можна зробити наступні висновки: схема №1 працює найнапруженіше й найменш рівномірно, з найвищим використанням несучої здатності. Схема №2 – помірніша й рівномірніша, із дещо більшим навантаженням на розкоси. Схема №3 — найжорсткіша й найстійкіша, з мінімальними напруженнями та найкращою рівномірністю роботи елементів.
- **8) Модель 1 – найважча й найбільш матеріалоємна.** Модель 2 є помітно легшою. Її вага приблизно менша на 32% аніж вага моделі №1. **Модель 3 є найлегшою та найбільш економною:** вага плити в 2–3 рази менша, ніж у інших моделей. Колони майже не впливають на різницю у вазі. Отже, за параметром матеріалоємності найоптимальнішим варіантом конструктивного вирішення плити буде модель, що спирається по контуру на колони (схема №3).

