

ВПЛИВ УМОВ СПИРАННЯ СТРУКТУРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ НА ХАРАКТЕР ЇЇ РОБОТИ

¹Циганенко Л.А., к.т.н, доцент,

liudmyla.tsyhanenko@snau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6628-3635

¹Срібняк Н.М., к.т.н, доцент,

nataliia.sribniak@snau.edu.ua, ORCID: 000-0003-3205-433X

¹Циганенко Г.М., старший викладач,

tsyganenkogm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3335-4804

¹Галушка С.А., старший викладач,

galushka_sa@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2789-8570

¹Волков Д.Г., старший викладач,

volkovvdg@gmail.com, ORCID: 0009-0008-9263-4102

¹Сумський національний аграрний університет

вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40000, Україна

Анотація. На підставі аналізу публікацій та досліджень щодо використання в якості перекриття металевих просторових ґратчастих структурних покриттів встановлено, що цей тип конструкцій є найбільш раціональним та характеризуються ефективною статичною поведінкою та своєю працездатністю. Проте, на напружено-деформований стан структурної конструкції можуть впливати певні фактори: від форми структурної ґратки, умови спирання та кількість опор до висоти структурної плити та характеру прикладання зусиль. Ці всі фактори впливають на кінцевий результат підбору перерізів несучих елементів та остаточне конструктивне рішення конструкції. Як підсумок можна стверджувати, що дослідження одного з цих факторів (регуляторів зусиль), який впливає на підбор перерізів несучих елементів і як наслідок на загальну матеріаломісткість конструкції, є актуальним. За основу регулятора зусиль в схемах скінчено-елементних моделей структурних покриттів в ПК ЛІРА-САПР було прийнято спосіб та кількість розташування елементів спирання конструкції, а саме колон. Розташування колон приймається за трьома схемами: колони розташовані по чотирьом кутівим опорам нижнього поясу; колони розташовані вздовж вздовж нижнього поясу з кроком 3 м та 6 м по двом паралельним сторонам конструкції; чотири опори, що зміщені всередину плити на 4,5 м з обох боків. Варіанти розташування опор були використані для визначення найбільш ефективної схеми з точки зору статичної поведінки конструкції і, як наслідок, найменш матеріалоємної. Ефективність визначалася за критерієм раціонального напружено- деформованого стану. Проводився підбір перерізів елементів за першою та другою групами граничних станів. Визначалась вага конструкцій за схемами з урахуванням підбору перерізів з максимальним використанням за умовами міцності та стійкості. Визначено, що за критерієм матеріалоємності ефективною є схема №3, що спирається на 4 колони, зміщені всередину плити на 4,5 м.

Ключові слова: статична робота, скінчено-елементна модель, розташування колон, міцність та стійкість, напружено-деформований стан, критерій матеріалоємності.

Вступ. Структурні конструкції – це просторові конструкції, що дозволяють перекривати великі прольоти та відповідно площі без проміжних опор, з певними вимогами та допущеннями до з'єднання їх конструктивних елементів та способу прикладання навантажень [1].

Характерною ознакою цих конструкцій є те, що вони можуть мати як двошарову так і багатошарову решітку з певною регулярністю та мінімальною варіацією розмірів поперечного перерізу несучих елементів, які формують кристалічну піраміду структури – так званий базовий елемент структурної конструкції. Кристалічна піраміда формується системою похилих, вертикальних і горизонтальних стержнів порядок яких нагадує кристали природного

походження, такі як графіт і алмаз. Фактично, об'єднуючи просторові стержні для забезпечення їх геометричної незмінності в піраміди, що мають квадратну, трикутну або шестикутну основу можна змодельовати базовий елемент структури з *тетраедру*, *пентаедру*, *гептаедру* (рис. 1) [2].

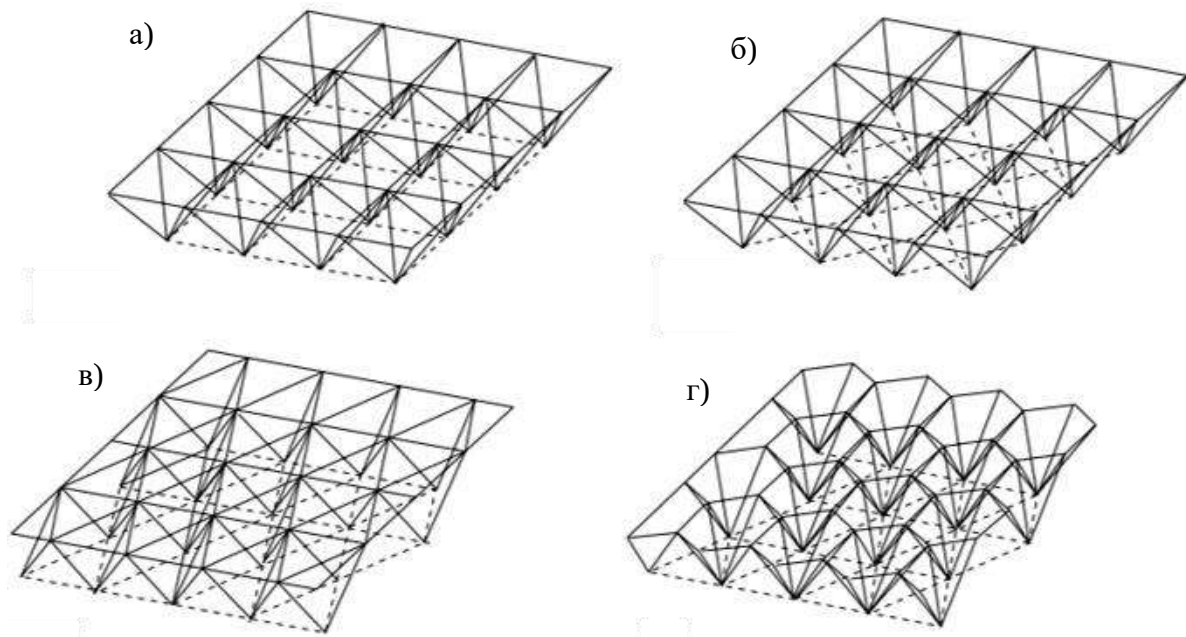


Рис. 1. Структурні піраміди на основі:
а, б – пентаедрів; в – тетраедрів; г – гептаедрів

Світовий досвід втілення структурних конструкцій має приклади унікальних споруд громадського та промислового призначення. Перша просторова структура була розроблена у 1907 році Олександром Грем Беллом з базової одиниці чотиригранної форми. Перше комерційне використання структурних конструкцій започаткував Макс Менгерінгхаузен – німецький винахідник системи Мего у 1943 року. А коли відомий футурист Бакмінстер Фуллер у 1954 році винайшов геодезичні куполи та отримав свій перший патент на розробку їх конфігурації, створивши таким чином поштовх до розробки криволінійних структурних покриттів.

Французький дизайнер Стефан дю Шато у 1959 році розробив модульну систему Unibat, що складалася з пірамідальних елементів із квадратною, трикутною або шестикутною основою. Його системи Tridirectionelle SDC (1957), Pyramitec (1960) та Tridimatec (1965) відрізнялись в першу чергу системою з'єднувальних елементів та формою несучих профілів.

Розвиток та удосконалення з'єднань елементів структурних пірамід сприяло виникненню унікальних будівель та споруд світового рівня. Поряд з традиційними геометричними формами просторових покриттів, наразі існує велика кількість їх футуристичних форм, що можна побачити в таких будівлях як аеропорт Станстед і вежа Банку Китаю, просторова структура Культурного центру Гейдара Алієва в Баку [3].

Складність металевих просторових структурних конструкцій та їх з'єднань, питання геометричної незмінності та роботи сталі в пластичному граничному стані було питанням ґрунтовних аналітичних та експериментальних досліджень такими фахівцями як: Хейман (1952, 1953), Стівенс (1961, 1968), Хонгладарамп та ін. (1968), Григорян (1971, 1972, 1973), Сак і Хеккі (1971), Саплм і Коллінз (1981), Парк і Вокер (1984), Шмідт (2000), Кавехом і Талатахарі (2009), Гойзаде тощо. (2012).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Те, що при проектуванні структурних конструкцій виникає низка питань, що пов'язані з конструктивним рішенням, які в подальшому впливають на напружено-деформований стан елементів звертали увагу ряд

дослідників. Конструктивні рішення таких конструкцій потребують особливої уваги підходу та технічних рішень [4]. Тривалий термін проєктування структурних конструкцій показав, що одне з головних питань при виборі їх конструктивної форми пов'язане в першу чергу з їх економічною ефективністю. Як показано у [5] вибір конструктивного рішення металевої структури є оптимізаційним завданням, оскільки матеріалоемність конструкції є одним з найважливіших показників її ефективності.

Автори [6] провели дослідження експлуатаційних характеристик довгопрогонових сталевих просторових конструкцій у порівнянні з плоскими системами і показали, що вага конструкції є визначальним фактором при остаточному виборі конструктивного рішення.

В роботі [7] автор дослідив зміну напружено-деформованого стану у двохшаровій ґратці структурної конструкції. Автор зробив висновок, що форма піраміди, кількість опорних систем та їх розташування значно впливають на розподіл зусиль в елементах і відповідно на вибір їх профілю. Автор показав, що регулюванням цих показників можна змінити економічну складову самої конструкції.

Залежність статичної поведінки від форми структурної піраміди наведено в [8]. Формоутворення та оптимізація для структурних конструкцій довільної форми, що підтримуються колонами, на основі оновленого методу густини сил наведені в [9]. В роботі [10, 11] показано, що спосіб розташування опорних систем (колон), створення попереднього напруження в елементах нижнього поясу, форма піраміди суттєво впливає на напружено-деформований стан стержнів структурної конструкції.

Проведені дослідження авторів [12-14] акцентують на те, що основною вимогою є відповідність конструкції критеріям міцності та жорсткості з одночасним показником мінімальної матеріалоемності при виконанні вищезазначених умов.

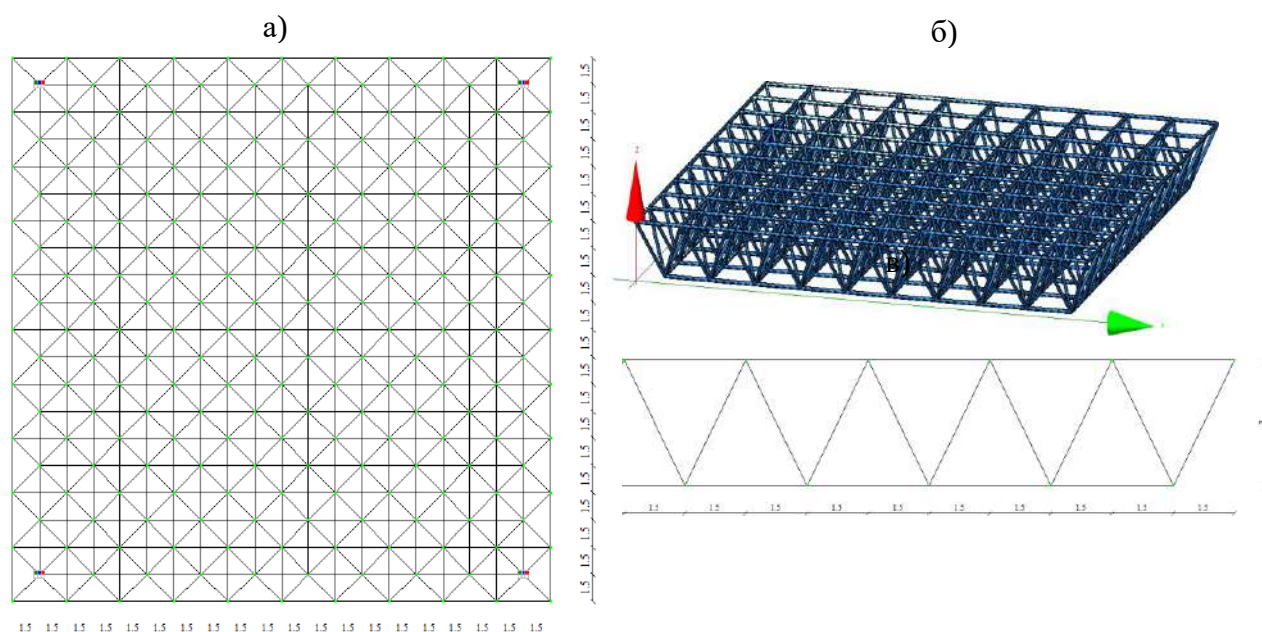
Автором в роботі [15] показана методика вибору оптимального конструктивного рішення сталевих просторових ферм при варіантному проєктуванні з урахуванням конструктивних, технологічних, економічних і експлуатаційних вимог. Авторами в роботі [16] доведено плив таких факторів як: місце розташування опор, наявність підтримуючої залізобетонної плити верхнього поясу структури на згин двохшарової структурної конструкції. На основі експериментальних досліджень було зроблено висновок, що наявність залізобетонної плити на верхньому поясі структури сприяє підвищенню міцності і жорсткості не тільки самого верхнього поясу але й запобігає руйнуванню всієї конструкції. Варіативне дослідження із застосуванням чисельних методів дає змогу шляхом послідовного перебору варіантів обрати конструкцію з оптимальними параметрами. Визначення найефективнішого рішення за критерієм мінімальної ваги (тобто за матеріаломісткістю) є одним із головних завдань на початкових стадіях проєктування. При оптимізації структурної конструкції потрібно враховувати не лише показники її матеріаломісткості, а й витрати праці на її виготовлення, транспортування та монтаж, оскільки сукупність цих чинників впливає на кінцеву її вартість. Важливою перевагою структурних конструкцій є можливість проєктування перерізів елементів таким чином, щоб максимально використовувати їх несучу здатність, що напряму сприяє економії сталі й зниженню загальної вартості конструкції.

Мета та завдання. Питання оптимізації конструктивного рішення металевих конструкцій, особливо просторових покриттів, без проміжних опор є актуальним, враховуючі тенденцію використання великопролітних полегшених конструкцій в цивільному будівництві. Метою досліджень є розуміння оптимізаційного шляху та напрямку, що дозволить отримати конструктивну схему працездатного просторового структурного покриття. Для вирішення цього питання проведемо варіативні дослідження конструктивних рішень структурного покриття найефективніше числовим методом в ПК ЛІРА-САПР, що реалізує метод скінчених елементів.

Матеріали та методика дослідження. Проведення варіативного дослідження конструктивного рішення структурного покриття найефективніше проводити числовим методом.

Числовий метод аналізу будівельних конструкцій (метод скінчених елементів) є одним з методів будівельної механіки, що реалізований в програмному комплексі ЛІРА-САПР. Цей

Результати досліджень. Дослідженню підлягає двохарова структура з розмірами 30,0×30,0 м у плані верхнього поясу та 27,0×27,0 м у плані нижнього поясу (рис. 2) з ортогональною ґраткою, що має розмір 3,0×3,0 м, рис. 2. Висота конструкції (товщина плити) – 3,0 м.



а – вид у площині XOY ; б – модель 3D; в – фрагментний вид у площині XOZ

- для схеми № 1 відстань між колонами прийнято 27 м;
- для схеми № 2 відстань між колонами прийнято 6 м та 3 м;
- для схеми № 3 відстань між колонами прийнято 18 м.

Діючими навантаженнями було прийнято постійні та тимчасові, а саме: власна вага елементів структури, що визначається в ПК ЛПРА-САПР автоматично; вага покриття, прийнята у вигляді зосередженої сили, що прикладена до вузлів верхнього поясу; змінне снігове навантаження для другого кліматичного району України – $1,87 \text{ кН/м}^2$ [19]. Змінне вітрове навантаження не було змодельоване, враховуючі те, що дія його впливу на виникнення внутрішніх зусиль приблизно становить 1 %, що можна вважати несуттєвим.

Для аналізу зміни напружено-деформованого стану елементів структурного покриття приймаємо умови, що початкова геометрія схем конструкцій, спосіб прикладання та діючі навантаження є постійними незмінними параметрами в усіх схемах. Змінним параметром є умови спирання що прийняті у схемах, а саме: кількість опор та їх розташування.

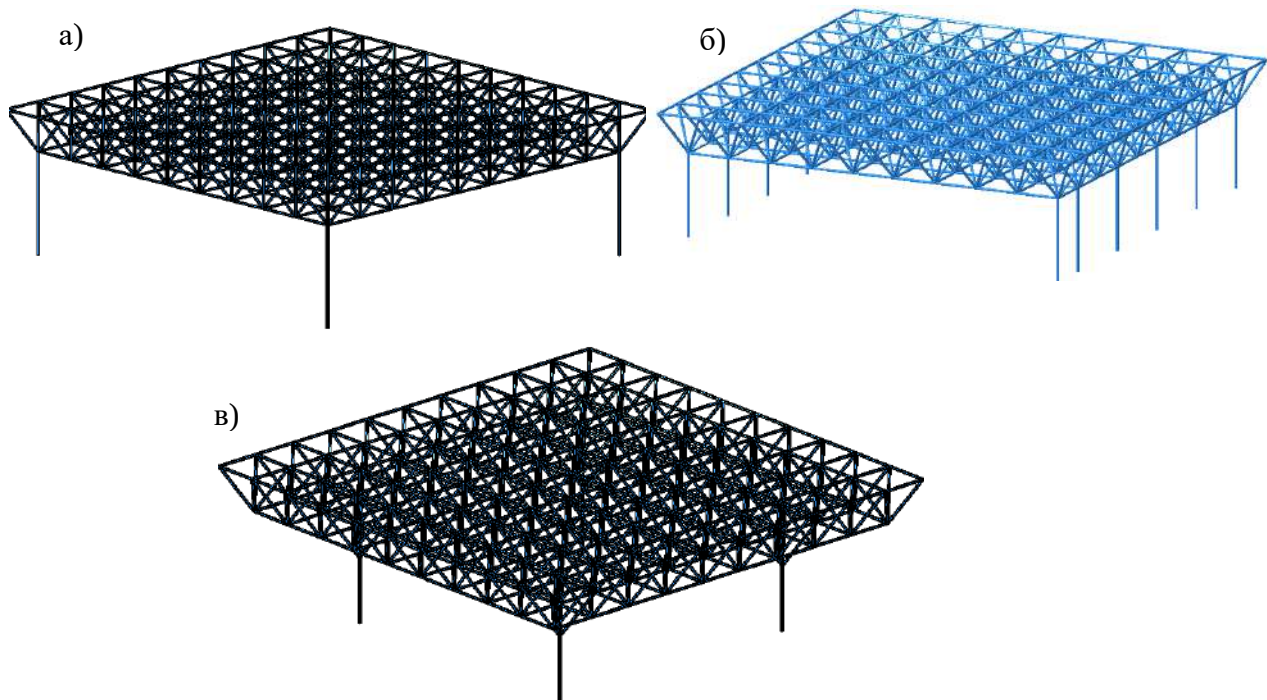


Рис. 3. Умови спирання структурного покриття: а – схема № 1 (чотири кутових опори нижнього поясу); б – схема № 2 (спирання вздовж нижнього поясу з кроком 3 м та 6 м); в – схема № 3 (чотири опори, що зміщені всередину плити на 4,5 м)

Отримані величини зусиль в елементах структури обмежені умовою міцності: для стержнів що працюють на розтяг і умовою міцності та стійкості для стержнів, що працюють на стиск.

Показники максимальних прогинів обмежені показниками граничного прогину [20].

Предметом дослідження є зміна роботи структурного покриття в залежності від розташування опор. Характер роботи опори структури визначає поведінку конструкції. Наприклад, при спиранні конструкції на чотири колони, що розташовані по опорним кутам, конструкція буде працювати в обох напрямках (площини XOZ і YOZ).

Рівність параметрів напружено-деформованого стану також обумовлена квадратною формою просторової сітки конструкції в плані. Чим більше форма плити в плані наближена до прямокутника, тобто чим більша різниця у співвідношенні сторін, тим більш нерівномірним буде перерозподіл осевих зусиль в стержнях її поясів у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Результати дослідження. Зміна умов спирання структурної конструкції відображається в різних деформованих схемах конструкцій (рис. 4).

Простежується не лише зміна величини максимального прогину а й характер прогинів, а саме: наявність вузлів що отримали так зване позитивне переміщення – схема № 1 це вузли, що належать опорним кутовим вузлам, схема № 2 це вузли, що належать опорним поясам вздовж колон, схема № 3 має тільки від'ємне значення прогинів.

Враховуючи симетричність отриманих переміщень, приведемо гістограму (рис. 5) прогинів вузлів для половини першого приопорного блоку.

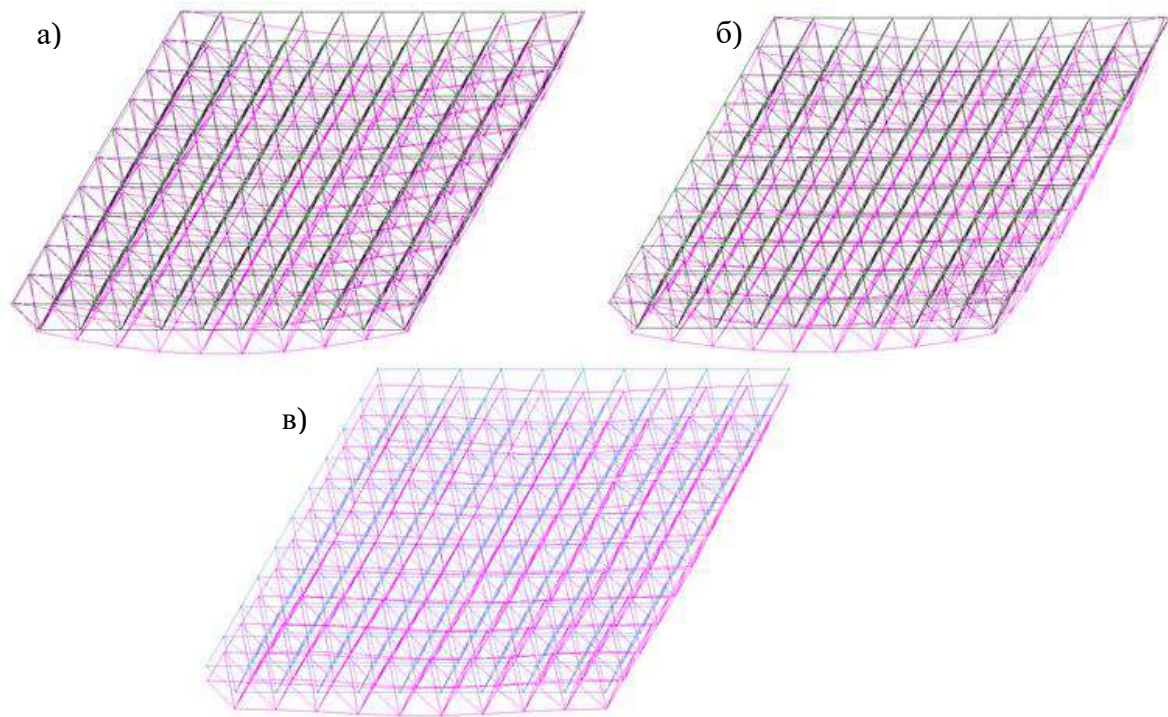


Рис. 4. Вихідні та деформовані схеми структурного покриття:
а – схема № 1; б – схема № 2; в – схема № 3

На рис. 5 наведено гістограму вертикальних переміщень вузлів у середній частині нижнього поясу, де f_z – це вертикальне переміщення вузлів вдовж осі Z.

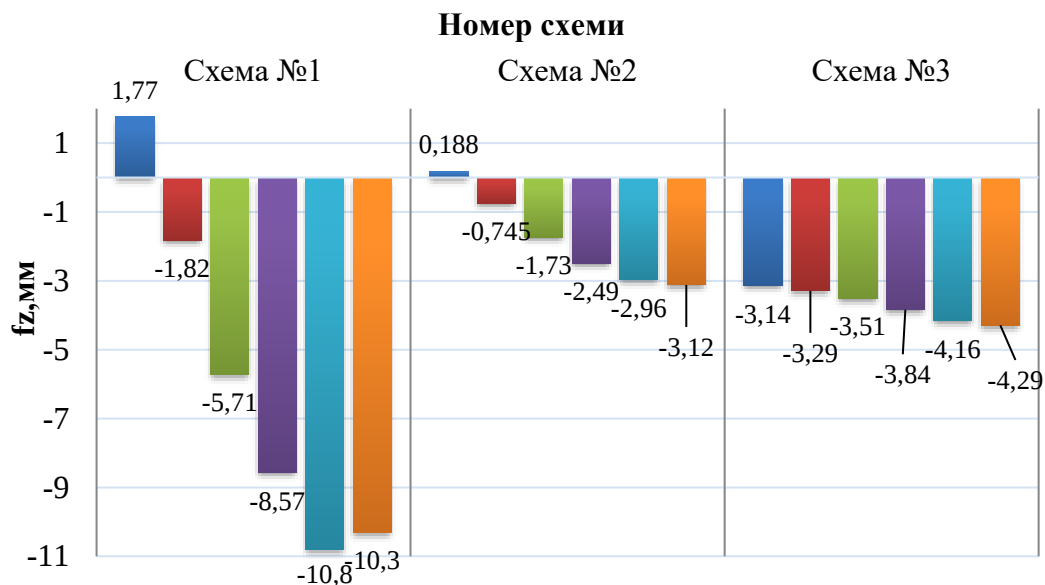


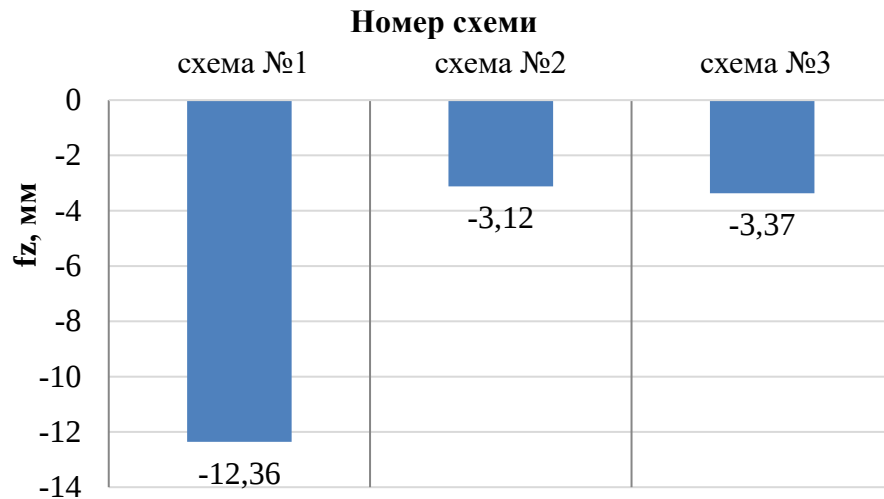
Рис. 5. Гістограма переміщень вузлів (половина блоку)

Отримані максимальні значення переміщень, що належать центральній частині конструкції для схем №1 та №2 порівнюємо з максимально допустимим прогином відповідно до [20] за формулою:

$$f = \frac{1}{250} = \frac{27000}{250} = 108 \text{ мм.} \quad (1)$$

$$\text{Для схеми №3 за формулою: } f = \frac{1}{250} = \frac{18000}{250} = 72 \text{ мм.} \quad (2)$$

На рис. 6 показані значення максимального переміщення вузлів для трьох схем структурного покриття.

Рис. 6. Максимальні значення прогинів f_z в схемах

Різниця в деформованих схемах структурних покриттів обумовлює різницю напруженого стану їх елементів.

У табл. 1 показані максимальні повздовжні зусилля N в усіх групах конструкцій стержнів.

Таблиця 1 – Максимальні зусилля N в елементах конструкції за схемами

Назва конструктивної групи стержнів	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Верхній пояс	-57,9	-19,36	-13,7
	1,33	1,93	13,6
Нижній пояс	0	-1,19	-6,23
	74,9	23,7	13,9
Розкоси	-38,6	-9,13	-20,2
	34	6,7	11,12

Для оцінки різниці між визначеними величинами зусиль за схемами приведемо в табл. 2 різницю їх величин у відсотках, це дозволить наочно зрозуміти тенденцію збільшення або зменшення. Знак «+» показує збільшення величини зусилля у % від зусилля в схемі № 1, знак «-» показує зменшення величини зусилля у %.

Таблиця 2 – Порівняння різниці у величинах зусилля N в елементах конструкції за схемами

Назва конструктивної групи стержнів	Різниця у % між схемою №1 та №2	Різниця у % між схемою №1 та №3	Різниця у % між схемою №2 та №3
Верхній пояс	-66,5	-76	-29,2
	-31,08	+90	+85
Нижній пояс	+1,19	+6,23	+80,9
	-68,3	-81,4	-41,3
Розкоси	-76	-47,6	+54,8
	-80,3	-67,3	+39,7

В табл. 3 приведено максимальні величини зусиль в колонах та відмінності у % за схемами.

Таблиця 3 – Максимальні зусилля в елементах колонах за схемами

Зусилля	Схема №1	Схема №2	Схема №3
N, т	-96,1	-22,02	-139
M _y , тм	±1,84	±1,25	±0,09
M _z , тм	±1,84	±0,02	±0,09
N, т, різниця у % зусиль між схемами	зусилля зменшилися на 77%		
		зусилля зросли 84,15 %	

У табл. 4 наведено % використання несучої здатності перерізу різними групами стержневих елементів для трьох схем структурної конструкції після першого ітераційного статичного аналізу.

Аналіз табл. 4 доводить, що всі елементи структурної ґратки значно недонапружені.

Таблиця 4 – Використання (%) несучої здатності перерізу для груп стержнів плит після першого ітераційного аналізу

Назва елементу	% використаного перерізу		
	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Верхній пояс	12,5	3,9	2,8
Нижній пояс	16,1	4,8	2,9
Розкоси	15	3,5	5,7
Колона	26	10	22

Незначний відсоток використання несучої здатності попередньо прийнятих перерізів свідчить про значний запас за міцністю та стійкістю в усіх схемах. Фактичний рівень напружень обумовив виникнення лише пружних деформацій, тому подальше розглядається робота елементів в пружній постановці.

Використовуючи підмодуль проектування металоконструкцій в ЛІРА-САПР було проведено підбір перерізів стержнів для усіх розрахункових груп відповідно до вимог міцності, стійкості та жорсткості. Результати розрахунку приведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Підібрані перерізи елементів схем

Номер схеми	Поперечний переріз (профільна труба), за схемою № 1 Сталь С 235	Поперечний переріз, підібраний за допомогою підпрограми ЛІРА-САПР на основі результатів статичного аналізу	
		Номер типу перерізу	Профіль труби, мм
Верхній пояс			
1	245×30	46	76×5,5
2	245×30	52	60×3
3	245×30	24	45×3
Нижній пояс			
1	245×30	24	76×5,5
2	245×30	24	73×4
3	245×30	12	50×3
Розкоси			
1	168×30	69	68×5,5
2	168×30	89	63,5× 3,5
3	168×30	39	57×3,5
Колони			
1	273×40	47	273×8
2	273×40	55	146×4,5
3	273×40	13	146×16

У табл. 6 наведено нові перерізи елементів та розрахункові ваги верхніх, нижніх поясів, розкосів і колон для всіх схем ґратки структури.

Таблиця 6 – Показники ваги елементів для верхнього поясу

Номер схеми	Номер елемента	Профіль	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів, м	Вага, т
Верхній пояс					
1	46	76×5,5	0,00955	660	6,303
2	52	60×3	0,004575	660	3,019
3	24	45×3	0,003106	660	2,049
Нижній пояс					
1	24	76×5,5	0,00955	594,00	5,67
2	24	73×4	0,006804	594,00	4,04
3	12	50×3	0,003476	594,00	2,06
Розкоси					
1	69	68×5,5	0,008474	1468	12,44
2	89	63,5×3,5	0,005177	1468	7,60
3	39	57×3,5	0,004616	1468	6,78

В табл. 7 окремо приведемо величину ваги перерізів, що моделюють колони структури з урахуванням їх кількості у схемі.

Таблиця 7 – Показники ваги елементів, що моделюють колони

Номер схеми	Номер елемента	Профіль	Вага 1 м.п. профілю, т	Вага одного елемента, т	Кількість елементів у схемі, шт	Загальна вага, т
1	47	273×8	0,05542	0,41	4	1,64
2	55	146×4,5	0,0157	0,12	12	1,40
3	13	146×16	0,05124	0,23	4	0,91

Загальна вага структур за схемами з урахуванням ваги колон, на які вони спираються розрахована в табл. 8.

Таблиця 8 – Показники загальної ваги конструкції

Номер схеми	Вага конструктивної плити, т	Вага елементів колон, т	Загальна вага, т	Різниця у вазі між схемою №1 та №2, схемою №2 та №3, %	
1	24,41	1,64	26,05	62,23%	36,1%
2	14,66	1,40	16,06		
3	10,89	0,91	11,80		

На рис. 7 показано гістограму загальної ваги моделей, включаючи вагу колон. З рис. 7 та табл. 8 видно, що вага конструкції за першою схемою (спирання структури на чотири кутові колони) на 62,23 % більша при порівнянні зі схемою № 2 (спирання структури на ряд колон по довгій стороні). При чому, порівняння схеми № 1 та схеми № 3 показує, що зміщення з контурної зони в середню на 4,5 м та встановлення розкосів між стержнем колони і площиною нижнього поясу, зменшує вагу структурної конструкції на 120,8 %.

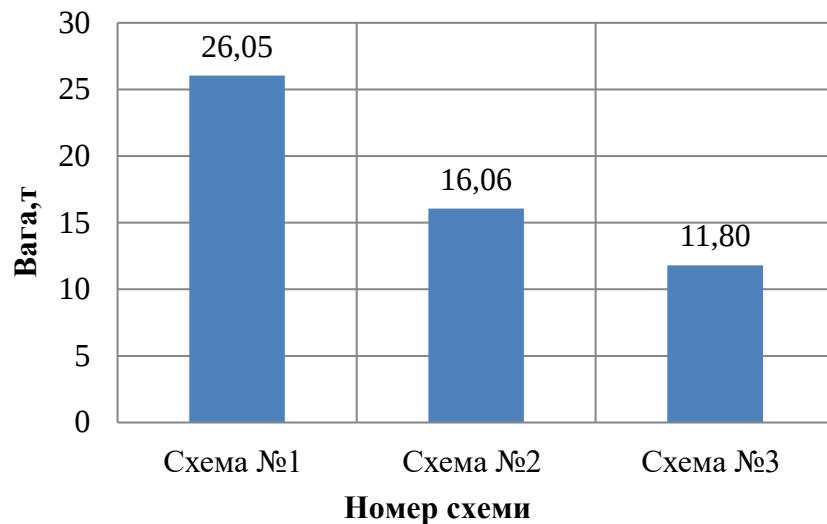


Рис. 7. Загальна вага конструкцій за схемами

Точність та достовірність результатів моделювання структурних конструкцій в ПК ЛІРА-САПР обумовлюється коректною побудовою скінчено-елементної схеми, аналізом статичної роботи уніфікованих груп стержнів (верхній пояс, нижній пояс, елементи решітки) та читанням результатів зусиль. Відповідно до результатів досліджень [11, 15, 16] в схемах структур, що були змодельовані елементи верхнього поясу працюють на стиск, елементи нижнього поясу – на розтяг, елементи решітки знаходяться під дією змінної осьової сили. За характером розподілу повздовжнього зусилля в стержнях верхнього і нижнього поясів ґратки структури його величини мають близькі за величиною значення, що відповідає правилам поведінки просторової решітчастої системи під дією рівномірно розподіленого навантаження.

За результатами статичного розрахунку, що проводився в пружній стадії роботи матеріалу, аналізувався напружено-деформований стан елементів схем за прийнятими перерізами, проводилась перевірка прийнятих та підбір нових перерізів. Підбір перерізів враховував граничну гнучкість елементів та вертикальні переміщення всієї конструкції. Адекватність розрахункового вибору перерізів груп елементів обумовлювалась вимогами та обмеженнями [19, 20], що повинні бути враховані при заданні жорсткості та параметрів матеріалів. Обмеженнями є виконання умови міцності для розтягнутих стержнів та стійкості для стиснутих стержнів, обмеженням за граничним прогином конструкції, є його максимально допустима величина. Для верхнього та нижнього поясів, розкосів були призначені типи конструктивної групи – як елемент фермової решітки; для колон – як елемент колони.

Коефіцієнт надійності за відповідальністю будівель прийнятий як 1,0. Коефіцієнт розрахункової довжини для колон у двох площинах був такий, що дорівнює 0,6; значення граничної гнучкості прийнято в межах 180-60а [18].

Висновки:

1. Структурна конструкція – це конструктивна система, яка суттєво реагує на зміну певних параметрів, які впливають на напружено-деформований стан елементів її ґратки. Ці впливи називають силовими регуляторами. В даному дослідженні в якості регуляторів зусиль було використовувано спосіб розташування колон, на які спиралась структурна конструкція.

2. Зміна умов спираючої конструкції вплинула на показники жорсткості. За виникаючими прогинами найменш жорсткою є схема № 1. Схема № 2 деформується як плита, що оперта по двом сторонам (спираюча по довжині на шість опор з кожного боку) з прогином 3,12 мм, що менше на 74,75 % у порівнянні зі схемою №1. Схема № 3 має максимальну величину прогину 3,37 мм що на 7,4 % більше у порівнянні зі схемою № 2. Але в усіх схемах максимальні величини прогинів не перевищують максимально допустимого значення – 108 мм.

3. Зміна умов спирання вплинула на показники міцності та стійкості елементів структури. При порівнянні схем №1 та №2 максимальна зміна торкнулась розкосів конструкції – зусилля впали на 76 % та 80 % відповідно. При порівнянні схем № 2 та № 3 максимальна зміна торкнулась нижнього та верхнього поясів – різниця між зусиллями складає 85% та 80,9 % відповідно. Відповідно, результати перевірки міцності попередньо прийнятих перерізів стержнів показали, що стержні структури в усіх схемах працюють зі значним недонапруженням (табл. 4).

4. Зміна умов спирання структури обумовила зміну величини зусиль та характеру роботи елементів, на які спирається структура. Так простежується зменшення зусиль в опорних елементах при порівнянні схем № 1 та № 2 – на 77 % (колони працюють на стиск з вигином), та збільшення на 30 % у порівнянні схем № 1 та № 3 (колони працюють на центральний стиск).

5. Підібрані перерізи стержнів структури за умовою міцності, стійкості та жорсткості, дозволили оцінити вагу кожної структурної схеми просторової конструкції (рис. 7). За критерієм матеріалоємності найбільш ефективним конструктивним рішенням є структура за схемою №3, що спирається на 4 колони, зміщені всередину плити на 4,5 м.

Перспективи подальших досліджень. Враховуючі отримані результати за схемою №3 доцільно провести дослідження зміни напружено-деформованого стану (НДС) елементів структурного покриття в залежності від умови закріплення зміщених опор та висоти підтримуючих стоек від колон до самого покриття для отримання закономірностей їх впливу на НДС всієї системи.

З цією метою для більш детального та оптимального проєктування необхідно провести декілька ітераційних розрахунків для визначення та підбору елементів з максимально повним використанням площі поперечного перерізу з урахуванням умов міцності та стійкості, що може дозволити суттєво зменшити вагу плити, при незначному збільшенні кількості типорозмірів профілів стержнів у структурних групах стержнів.

Також доцільно провести в ПК ЛІРА-САПР розрахунок схеми структури з урахуванням її геометричної змінності.

Література

1. Basil B., Lakshmi B.S., et al. Space truss design using STADD. Pro Software. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2019. Vol. 6, Issue 4. С. 3777–3782. URL: <https://www.irjet.net/archives/V6/i4/IRJET-V6I41180.pdf> (date of access: 06.05.2025).
2. Chilton J. Space Grid Structures. Routledge. 2007. <https://doi.org/10.4324/9780080498188>.
3. Cabo A. D. Evolution and Trends in Design. Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. *International Journal of Space Structures*. 2009. SAGE Publications. <https://doi.org/10.1260/026635109788251449>.
4. Машков І. Л., Скребнєва С. М., Баранецька Д. С., Глушаниця А. І. Аналіз ефективності роботи елементів просторового покриття. *Теорія та практика дизайну: зб. наук. праць. Архітектура та будівництво*. 2023. Вип. 27. С. 63–68. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2023.27.8>.
5. Ashtul1 S. A., Patil S. N. Review on Study of Space Frame Structure System. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2020. Vol. 7, Issue 4. P. 667–672. <https://www.irjet.net/archives/V7/i4/IRJET-V7I4137.pdf>
6. Patel B., Jamani A. Parametric Study of Different Structural Systems for Long Span Industrial Structures. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4, Issue 4. P. 2164–2167. <https://www.irjet.net/archives/V4/i4/IRJET-V4I4452.pdf>
7. Madi U. R. An investigation into the design parameters of double layer space frame grid. *Space Structure*. 1987. P. 215–222.
8. Setareh M., Bacim F., Polys N., Jones B. Development of the Web-Based Structure and Form Analysis System (SAFAS) for Architectural Education. *Journal of Architectural Engineering*. 2015. Vol. 21, № 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000179](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000179).

9. Zhao D., Zhang Yu, T., Gao H. Form-finding and optimization for free form grid structures supported by branching columns based on updated force density method. *Structures*. 2022. Vol. 44. P. 1190–1203. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.063>.
10. Sribniak N. та ін. Напружено-деформований стан структурної плити. *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2020. № 2 (55). С. 35–43. <https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2339>.
11. Tsyhanenko L. та ін. Determining the optimal size of the basic element in a space grid structure. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*. 2023. Vol. 12. No. 2023.12. P. 201–208. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.22>.
12. Білик О. С. Сталь у реконструкції будівель : монографія. Київ : Український центр сталевих будівництва, 2016. 167 с.
13. Facilitator C. Space Frame Structure; an analysis of its benefit. *Constro Facilitator*. URL: <https://constrofacilitator.com/space-frame-structure-an-analysis-of-its-benefit> (дата звернення: 06.05.2025).
14. Білик А. С. Оптимальний вибір конструкцій з дискретно змінною схемою навантаження. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського*. Вип. 14. С. 70–78. 2014.
15. Білик А. Вибір оптимальних конструктивних рішень сталевих кроквяних ферм : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук; Київський нац. ун-т буд-ва і архітектури. Київ, 2009. 20 с
16. Lakshmikandhan K. N., Senthil R., Jayachandran A. S., Sivakumar P., Ravichandran R. Parametric Studies on the Behavior of Steel and Composite Space Structures. *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 25(3). P. 169–183. DOI: 10.1260/0266-3511.25.3.169.
17. Розрахунок та проектування конструкцій. LiraLand : веб-сайт. URL: <https://www.liraland.ua> (дата звернення: 06.05.2025).
18. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі Зміною № 1. На заміну ДСТУ Б В.2.6-194:2013 та ДБН В.2.6-163:2010 у частині розділу 1 ; чинний від 2015-01-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2014. 199 с. URL: https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=58106 (дата звернення: 16.04.2024).
19. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування : на заміну СНиП 2.01.07-85 ; чинний від 01 січ. 2007 р. : [офіц. вид.]. Мінбуд України. Київ : Мінбуд України, 2006. 14 с.
20. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження та впливи : чинні від 01 січ. 2007 р. : [офіц. вид.] / Мінрегіонбуд України. Київ : Мінрегіонбуд України, 2006. 96 с.

References

- [1] B. Basil, B.S. Lakshmi, et al., "Space truss design using STADD. Pro Software", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 6, Issue 4, pp. 3777-3782, 2019. [Online]. Available: <https://www.irjet.net/archives/V6/i4/IRJET-V6I41180.pdf>. Accessed on: May 06, 2025.
- [2] J. Chilton, *Space Grid Structures*. Routledge, 2007. <https://doi.org/10.4324/9780080498188>.
- [3] A.D. Cabo, "Evolution and Trends in Design. Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures", *International Journal of Space Structures*. 2009. SAGE Publications. <https://doi.org/10.1260/026635109788251449>.
- [4] I.L. Mashkov, S.M. Skrebnieva, D.S. Baranetska, A.I. Hlushanitsia, "Analiz efektyvnosti roboty elementiv prostorovoho pokryttia", *Teoriia ta praktyka dyzainu: zbirnyk naukovykh prats. Arkhitektura ta budivnytstvo*, Issue 27, pp. 63–68, 2023. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2023.27.8>.

- [5] S.A. Ashtull, S.N. Patil, "Review on Study of Space Frame Structure System", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, Issue 4, pp. 667–672, 2020. <https://www.irjet.net/archives/V7/i4/IRJET-V7I4137.pdf>
- [6] B. Patel, A. Jamani, "Parametric Study of Different Structural Systems for Long Span Industrial Structures", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, Issue 4, pp. 2164–2167, 2017. <https://www.irjet.net/archives/V4/i4/IRJET-V4I4452.pdf>
- [7] U. R. Madi, "An investigation into the design parameters of double layer space frame grids. Space Structure" *Sage Journals*, vol. 27, Issue 4, pp. 215–222, 1987.
- [8] M. Setareh, F. Bacim, N. Polys, B. Jones, "Development of the Web-Based Structure and Form Analysis System (SAFAS) for Architectural Education", *Journal of Architectural Engineering*, vol. 21, no. 3, 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000179](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000179)
- [9] D. Zhao, Yu.T. Zhang, H. Gao, "Form-finding and optimization for free form grid structures supported by branching columns based on updated force density method", *Structures*, vol. 44, pp. 1190–1203, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.063>
- [10] N. Sribniak, et al, "Napruzhenno-deformovanyi stan strukturnoi plyty", *Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*, no. 2 (55), pp. 35–43, 2020. <https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2339>
- [11] L. Tsyhanenko, et al. "Vyznachennia optymalnoho rozmiru bazovoho elementa u prostorovii stryzhnevii konstruktsii", *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, vol. 12, no. 2023.12, pp. 201–208, 2023. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.22>.
- [12] O.S. Bilyk, *Stal u rekonstruktsii budivel: monohrafiia*. Kyiv: Ukrainskyi tsentr stalevoho budivnytstva, 2016.
- [13] C. Facilitator, "Space Frame Structure; an analysis of its benefit", *Constro Facilitator*. [Online]. Available: <https://constrofacilitator.com/space-frame-structure-an-analysis-of-its-benefit>. Accessed on: May 06, 2025.
- [14] A.S. Bilyk, "Optymalnyi vybir konstruktsii z dyskretno zminnoiu skhemoiu navantazhennia", *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho instytutu stalevykh konstruktsii imeni V. M. Shymanovskoho*, Issue 14, pp. 70–78, 2014.
- [15] A. Bilyk, "Vybir optymalnykh konstruktyvnykh rishen stalevykh krokviannykh ferm", avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Kyiv: Kyivskyi nats. un-t budivnytstva i arkhitektury, 2009.
- [16] K.N. Lakshmikandhan, R. Senthil, A.S. Jayachandran, P. Sivakumar, R. Ravichandran, "Parametric Studies on the Behavior of Steel and Composite Space Structures", *International Journal of Space Structures*, vol. 25(3), pp. 169–183, 2009. DOI: 10.1260/0266-3511.25.3.169.
- [17] Rozrakhunok ta proektuvannia konstruktsii, LiraLand : web-site. [Online]. Available: <https://www.liraland.ua>. Accessed on: May 06, 2025.
- [18] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia. Zi Zminoiu № 1. Na zaminu DSTU B V.2.6-194:2013 ta DBN V.2.6-163:2010 u chastyni rozdil 1; chynnyi vid 2015-01-01. Vyd. ofits. K: Minrehion Ukrainy, 2014. [Online]. Available: https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=58106. Accessed on: April 16, 2025.
- [19] DSTU B V.1.2-3:2006. Prohyny i peremishchennia. Vymohy proektuvannia. Na zaminu SNyP 2.01.07-85; chynnyi vid 2007-01-01. Vyd. ofits. K: Minbud Ukrainy, 2006
- [20] DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia ta vplyvy, chynnyi vid 01.01.2007. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2006.

**INFLUENCE OF ARRANGEMENT OF COLUMNS OF A SPACE GRID STRUCTURE
ON ITS BEHAVIOR**

¹**Tsyhanenko L.A.**, PhD., Associate Professor,
liudmyla.tsyhanenko@snau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6628-3635

¹**Sribniak N.M.**, PhD., Associate Professor,
nataliia.sribniak@snau.edu.ua, ORCID: 000-0003-3205-433X

¹**Tsyhanenko G.M.**, senior lecturer,
tsyhanenkogm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3335-4804

¹**Halushka S.A.**, senior lecturer,
galushka_sa@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2789-8570

¹**Volkov D.G.**, senior lecturer,
volkovvdg@gmail.com, ORCID: 0009-0008-9263-4102

¹*Sumy National Agrarian University*
160 Gerasyma Kondratyeva str., Sumy, 40000, Ukraine

Abstract. Based on the analysis of publications and studies on the use of metal spatial lattice structural coatings as a slab, it has been established that this type of structure is the most rational and is characterised by effective static behaviour and its performance. However, the stress-strain state of a structural structure can be influenced by certain factors: from the shape of the structural grid, the bearing conditions and the number of supports to the height of the structural slab and the nature of the forces applied. All these factors influence the final result of the selection of load-bearing element cross-sections and the final structural design. As a result, it can be argued that the study of one of these factors (force regulators), which affects the selection of cross-sections of load-bearing elements and, as a result, the overall material consumption of the structure, is relevant. The basis of the force regulator in the schemes of finite element models of structural coatings in LIRA-SAPR software was based on the method and number of arrangement of structural support elements, namely columns. The arrangement of the columns is accepted according to three options: columns located along the four corner supports of the lower belt; columns located along the lower belt with a step of 3 m and 6 m on two parallel sides of the structure; four supports shifted inside the structure by 4.5 m on both sides. The options for the location of the supports were used to determine the most efficient arrangement in terms of the static behaviour of the structure and, as a result, the least material-intensive. The efficiency was determined by the criterion of the rational stress-strain state. The cross-sections of the elements were selected according to the first and second groups of limit states. The weight of the structures was determined according to the schemes, taking into account the selection of cross-sections with maximum use according to the conditions of strength and stability. It was determined that, according to the material consumption criterion, model No. 3, based on 4 columns shifted inside the slab by 4.5 m, is effective.

Keywords: static behaviour of the structure, finite element model, column arrangement, strength and stability, stress-strain state, material consumption criterion.

Стаття надійшла до редакції 7.05.2025

This work © 2025 by Tsyhanenko L.A., Sribniak N.M., Tsyhanenko G.M., Halushka S.A., Volkov D.G. is licensed under CC BY 4.0