

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТРУКТУРНОЇ ПЛИТИ ПОКРИТТЯ

<sup>1</sup>Срібняк Н.М., к.т.н., доцент,  
nataliya.sribnyak.17@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3205-433X

<sup>1</sup>Циганенко Л.А., к.т.н., доцент,  
tsyganenkola@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6628-3635

<sup>1</sup>Галушка С.А. старший викладач,  
galushka\_sa@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2789-8570

<sup>1</sup>Циганенко Г.М., старший викладач,  
tsyganenkogm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3335-4804

<sup>1</sup>Сумський національний аграрний університет  
вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40000, Україна

**Анотація.** На перерозподіл і величину осевих зусиль в стержнях структурних плит впливає ряд факторів: спосіб розташування та кількість опор, наявність чи відсутність попереднього натягу в конструкції, форма базового кристалу плити, що є формоутворюючим, висота (товщина) плити, що може варіюватися в певних допустимих межах. Зміна однієї з цих ознак при незмінній решті показників суттєво змінює напружено-деформований стан конструкції.

В статті наведено опис скінченоелементних моделей структурної плити покриття з розміром в плані 12,0×24,0 м. Прийнято чотири моделі плити, що відрізняються лише одним параметром – товщиною конструкції. Прийнято такі значення висоти конструкції: 1,5 м (модель № 1); 1,3 м (модель № 2); 1,1 м (модель № 3); 0,9 м (модель № 4). Виконано статичні та конструктивні розрахунки всіх моделей, що прийнято. Підібрано нові профілі конструктивних груп стержнів таким чином, щоб вони відповідали умовам перевірки за першою та другою групами граничних станів та відсоток використання перерізу стержня був якомога вищим. Проаналізовано максимальні прогини моделей після статичного розрахунку. Найменша вага як критерій оптимальності є для будівельних конструкцій, зокрема металевих, найбільш поширеним критерієм, оскільки цей критерій достатньо легко формалізувати.

Обчислено вагу кожної моделі плити й встановлено, що оптимальним конструктивним рішенням є модель № 1 з висотою 1,5 м, оскільки лише для цієї моделі деформативність знаходиться в допустимих межах. Модель, що характеризується найменшою вагою, є модель № 3, але максимальний вертикальний прогин такої конструкції є більшим за гранично допустимий.

У висновках встановлено, що аналіз переміщень вузлів моделей плити виявив, що лише максимальний прогин плити за моделлю № 1, не перевищує гранично допустимий прогин в 4,8 см. Максимальні прогини в моделях №№ 2, 3, 4 перевищують гранично допустиме значення абсолютного прогину. Отже, в моделях №№ 2, 3, 4 умова перевірки за другою групою граничних станів не виконується й модель № 3, що має найменшу вагу, не може бути прийнята як певне конструктивне рішення. Зважаючи на умову достатньої жорсткості, оптимальним конструктивним вирішенням буде модель № 1. Різниця у вазі моделі № 1 (8,9 т) та моделі № 3 (8,33 т) з найменшою вагою становить 6,8 %.

**Ключові слова:** структурна плита, товщина плити, матеріалоемність, регулятор зусиль.

**Вступ.** Стержньові структури, зокрема структурні плити, характеризуються рядом переваг, насамперед, завдяки природі своєї будови. В основі кожної структурної плити можна виділити базовий просторовий елемент, що являє собою систему похилих та горизонтальних стержнів. Порядок цих стержнів є упорядкованим і нагадує кристали природнього походження графіт, алмаз.

Гранями правильних багатогранників, що також є відомими як тіла Платона, є плоскими правильними багатокутниками. Таких багатогранників можна виділити лише п'ять – тетраедр, октаедр, куб, додекаедр, ікосаедр. Будь-які з них або комбінації їх в просторі можуть бути базою або, інакше кажучи, формоутворюючим елементом для структурної конструкції [1].

Для утворення структурної плити такий базовий елемент слід скопіювати вздовж осей  $X$ ,  $Y$  необхідну кількість разів для утворення конструкції структурної плити.

Найбільш часто як базовий елемент використовуються в практиці проектування структурних плит тетраедр, куб, октаедр [1]. Так, з'єднавши однакових два тетраедра в одній вершині (верхній елемент буде симетричним відображенням нижнього) можна отримати простий формоутворюючий елемент структурної плити.

За своєю природою структурні плити, що є стержньово-вузловими конструкціями й утворені з базових елементів відрізняються ефективною статичною роботою стержнів конструкції, що під навантаженням зазнають зусиль розтягу чи стиску. Завдяки цьому сталь є найбільш придатним матеріалом для втілення таких структурних плит в життя.

Варіантів конструктивних рішень структур при заданих параметрах можна створити досить багато. Знаходження оптимальної конструкції за певним заданим критерієм є важливою й актуальною пошуковою задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [1–11] наведено ґрунтовне та різнопланове дослідження «просторових сіток» або структур.

Ефективними конструкціями, що характеризуються невеликою матеріалоемністю й такими, що мають змогу перекривати великі прольоти, є структурні плити. Просторова стержньова конструкція структури дає можливість багатоваріантного проектування та пошуку нових раціональних форм.

Більшість структурних форм, у тому числі більшість вузлів просторової структури, є модульними.

Структурні конструкції – з криволінійною поверхнею чи з плоскою, є легкими, міцними, просторовими, модульними конструкціями масового виробництва. Автором ідеї таких конструкцій є Олександр Грем Белл. На початку 20 ст. він експериментував з просторовими фермами, що склалися з октаедричних та тетраедричних блоків [1].

В 1907 р. О. Беллом була побудована одна із перших структурних конструкцій – оглядова вежа в Бейн Бхреа (США). В цій конструкції застосовувалися литі вузли та трубчаті стержневі елементи [1].

Для зведення структурних конструкцій використовувалися також і готові модулі. У Великій Британії в 1950-х роках компанія Denings of Chard стала розробником системи Space Deck. Ця система передбачає болтове з'єднання збірних сталевих модулів пірамідальної конфігурації. Ці збірні модулі мають розміри в плані  $1,22 \times 1,22$  м та  $1,05$  м або  $0,61$  м в глиб відповідно [1].

Модуль, що є подібним до системи Space Deck, має також розміри в плані  $1,22 \times 1,22$  м, але із загальною глибиною  $0,6$  м. Такі модулі було прийнято для конструкцій покриття та перекриття в модульній будівельній системі Nenk 3. Ця система була розроблена у Великій Британії компанією Denings за замовленням Міністерства будівництва при будівництві казарм на початку 1960-х років [1].

Конрад Ваксман в 1959 р. розробив просторову структуру для ангарів літаків із великими прольотами для ВПС США. Технічне завдання вимагало великої гнучкості в конструкції, геометрії та типі будівлі, а також вимагало, щоб компоненти були придатними для повторного використання [1].

Система Конрада Ваксмана включала складний універсальний з'єднувач, що було виготовлено із комбінації стандартних кованих елементів в кількості чотири штуки. Це дозволило поєднувати до двадцяти трубчастих елементів у кожному з'єднанні [1].

В [2–11] наведено ґрунтовне та різнопланове дослідження «просторових сіток» або структур й сучасні конструктивні вирішення плоских та криволінійних покриттів, що

являють собою просторові стержньові структури покриття.

В [12] виконано числове дослідження з метою визначення найефективнішої за параметром матеріалоемності моделі структурної плити в залежності від характеру розташування опорних стійок та їх кількості.

Визначення оптимальної форми базового формоутворюючого елемента ґратчатої структури плити наведено в [13].

Питання оптимізаційного проектування структурних плит покриття є комплексним. Оптимальне конструктивне рішення може бути представлено як функція, що залежить від декількох факторів, що є змінними величинами й зміна хоча би одного з яких яких призводить до змін напружено-деформованого стану.

Так, вибір оптимальної висоти (товщини) плити є актуальною задачею проектування структур.

При призначенні висоти структурної плити із спільного розгляду умови стійкості верхніх й міцності нижніх поясів ( $N_{ma} \leq \varphi R_y A_{ma}$ ;  $N_{mi} \leq R_y A_{mi}$ ) та обмеження плити за прогинами ( $w_{max} \leq [ff]$ ) можна знайти мінімальну висоту структурної плити  $h_{min}$ . При такій товщині одночасно досягається граничний стан поясів за міцністю та стійкістю й також досягається граничний стан конструкції в цілому за деформаціями.

Якщо висоту структурної плити призначити більше ніж  $h_{min}$ , то прогини плити будуть меншими за ті, що дозволяються за [14], перший граничний стан конструкції буде виникати раніше, аніж другий. У цьому випадку при забезпеченні несучої здатності стержнів решітки стає можливим використання резерву несучої здатності поясів при пружнопластичній стадії їх роботи. Таким чином,  $h_{min}$  є також межею, вище якої можна враховувати розвиток пластичних деформацій, що рекомендується при проектуванні. Таке врахування призводить до зниження витрати матеріалів й зменшення кількості типорозмірів стрижнів.

**Метою** роботи є визначення за критерієм матеріалоемності найбільш ефективного конструктивного рішення структурної сталеві плити покриття розміром в плані 12,0×24,0 м з-поміж моделей, що досліджуються. Регулятором зусиль в моделях плит виступає параметр товщини (висоти) плити.

Для досягнення мети необхідно здійснити такі розрахункові **завдання**:

- 1) дослідити фактори, що впливають на зміну зусиль в стержнях плит;
- 2) прийняти один із змінних параметрів в якості регулятора зусиль в стержневих елементах структурної плити;
- 3) створення з використанням методу скінчених елементів із застосуванням ПК ЛІРА-САПР декілька скінченоелементних моделей, що будуть відрізнятися одна від одної лише одним параметром – товщиною (висотою плити);
- 4) прийняти (призначити в першому наближенні) в першій розрахунковій ітерації параметри жорсткості для всіх конструктивних груп стержневих елементів плити – призначити певні профілі труб для елементів для всіх варіантних моделей плити, що прийнято до аналізу та розрахунку;
- 5) виконати статичний розрахунок з жорсткостями першого типу (1-ша ітерація) всіх розрахункових моделей структурної плити;
- 6) на основі отриманих зусиль та переміщень узлів в модулі «Металеві конструкції» ПК ЛІРА-САПР підібрати нові скориговані розміри перерізів стержневих елементів плити;
- 7) обчислити згідно нових призначених перерізів стержневих елементів моделей плит вагу кожної моделі плити, що досліджується. Обрати модель, що характеризується найменшою вагою;
- 8) призначити нові параметри жорсткості, обчислені в модулі «Металеві конструкції» й виконати другий ітераційний статичний розрахунок моделей;
- 9) за новими даними після другого ітераційного розрахунку оцінити та порівняти параметри напружено-деформованого стану, відсоток використання перерізів за першою та другою групами граничних станів моделей плит, що досліджуються;
- 10) сформулювати висновки.

**Матеріали та методи дослідження.** Серед методів, що застосовувалися в цій роботі слід виділити наступні:

– метод скінчених елементів – для моделювання розрахункових моделей структурної плити в середовищі ПК Ліра-САПР. Метод також застосовано для визначення напружено-деформованого стану моделей, прийнятих до розрахунку;

– метод розрахунку сталевих елементів в модулі «Металеві конструкції» – для конструювання стержневих елементів структурних плит за методикою обраних норм конструювання [15], оцінки відсотку використання площі перерізу стержнів за 1 ГС та 2 ГМ норм [15].

**Результати дослідження.** *Алгоритм числового експерименту.* Висота плити є тим фактором (регулятором зусиль), що поряд з іншими факторами (спосіб розташування опор-стійок, створення попереднього натягу в затяжці нижнього поясі, штучне пониження рівня опор, зміна форми базового елемента-кристалу), суттєво впливає на перерозподіл зусиль в стержнях просторової структурної плити.

З метою визначення за параметром оптимальної висоти найбільш ефективного рішення структурної плити прийнято чотири варіанти плити, що відрізняються між собою лише товщиною (висотою) плити. Товщина плити варіюється в межах від  $(1/16 \div 1/24) l$  й прийнято такі товщини плити: 1,5 м; 1,3 м; 1,1 м; 0,9 м.

В рамках виконання числового експерименту планується здійснити такі етапи:

– Використовуючи ПК Ліра-САПР 2024 створити чотири скінченоелементні моделі структурної плити розміром в плані  $12,0 \times 24,0$  м, що відрізнялися би одна від одної лише одним параметром – товщиною плити ( $t = 1,5$  м;  $1,3$  м;  $1,1$  м;  $0,9$  м).

– В розрахунковій моделі виділено три конструктивних групи стержнів: елементи верхнього поясу, елементи нижнього поясу та елементи решітки (стержні та розкоси).

– При першій ітерації цим групам елементів призначено перерізи профілю з труб (табл. 1). Виконується статичний розрахунок для всіх чотирьох моделей структурних плит. За результатами статичного розрахунку та використовуючи модуль «Металеві конструкції» ПК Ліра-САПР за умовами міцності та стійкості (умовами першої групи граничних станів) та умовами деформативності (другої групи граничних станів) автоматично підбираються нові параметри жорсткості для груп стержнів плитної конструкції.

– Виконується другий ітераційний статичний розрахунок для чотирьох моделей структурної плити з новими жорсткостями перерізів елементів.

– Аналіз напружено-деформованого стану моделей структурної плити після другого ітераційного розрахунку.

– Аналіз відсотків використання площі перерізів згідно результатів підбору перерізів за першою та другою групами граничних станів.

– Обчислення ваги кожної моделі структури за результатами конструювання після другого ітераційного розрахунку.

– Визначення найбільш ефективного конструктивного рішення структурної плити з-поміж чотирьох її варіантів, що досліджувалися.

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

Назва елемента	Поперечний переріз, см (ГОСТ 8732-78*)	$E, \tau/\text{м}^2$	$R, \tau/\text{м}^3$	$\mu$	Марка сталі	$q, \tau/\text{м}$
1. Стержні верхнього поясу	Труба 114×20	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	C235	0,046
2. Стержні нижнього поясу	Труба 114×20	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	C235	0,046
3. Елементи решітки структурної плити	Труба 68×6	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	C235	0,0092

Скінченоелементна модель структурної плити. В якості конструкції, що досліджується, прийнято структурну сталеву плиту (рис. 1) з розмірами в плані 12,0×24,0 м, тобто із відношенням сторін як 1:2.

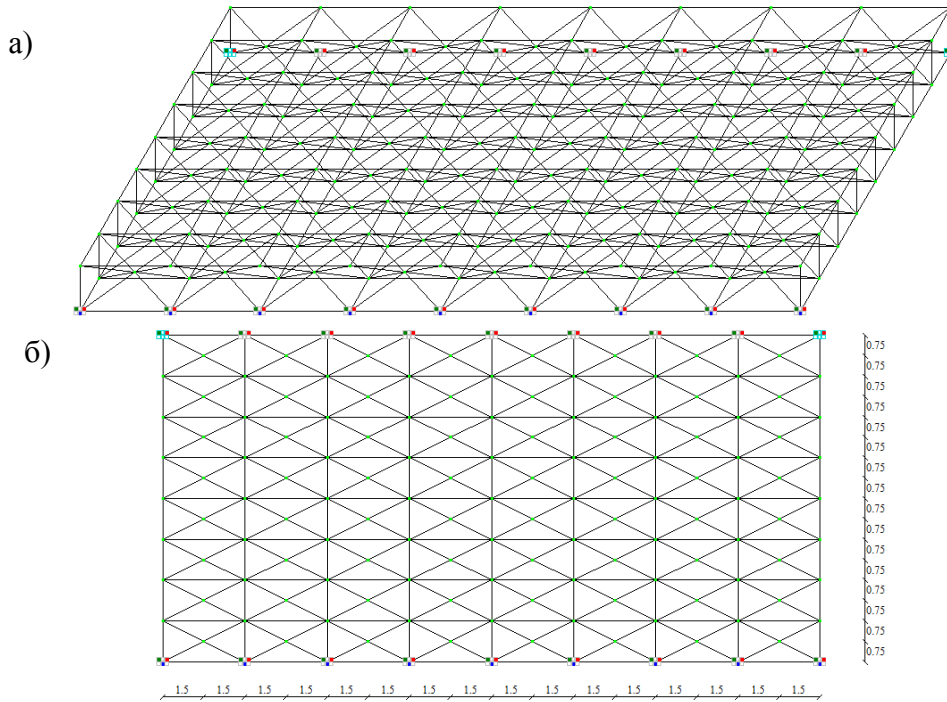


Рис. 1. Скінченоелементна модель структурної плити за схемою №1:  
а – ізометричний вигляд; б – вид конструкції в площині XOY

Плита має ортогональну сітку поясів з розміром плоскої ячейки поясу (верхнього та нижнього) – 1,5×3,0 м), рис. 2.

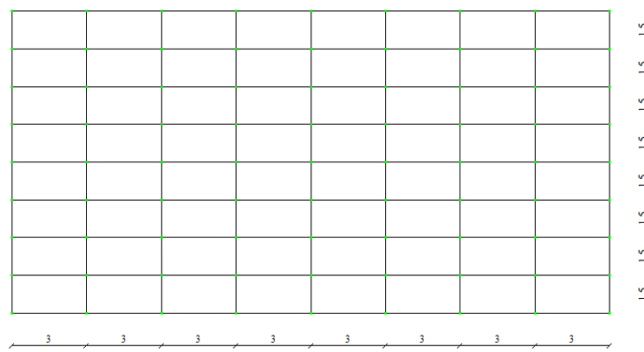


Рис. 2. Ортогональна сітка поясів (верхнього та нижнього)

Вузли верхнього та нижнього поясів з'єднані розкосами. За базовий елемент прийнято кристал за формою, наведеною на рис. 3. Він являє собою дві піраміди з прямокутною основою 1,5×3,0 м, й такі, що мають різний напрямок вершин і такі, що з'єднуються одна з одною у вершині.

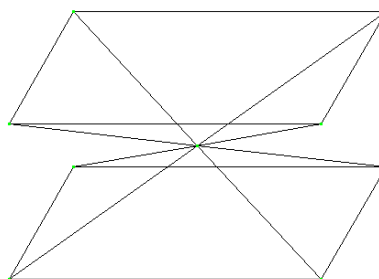


Рис. 3. Базовий елемент, що утворює структурну плиту

Розміри в плані, навантаження, що діє на плиту, вид базового формоутворюючого елемента, спосіб спирання прийнято як параметри, що не змінюються.

В якості обмежень прийнято умову міцності для стержнів, що працюють на розтяг, умова стійкості для елементів, що працюють на стиск, прийнято також обмеження за граничною гнучкістю [15] та граничний прогин конструкції [14].

За ознакою схеми №5 (схема загального вигляду) із стержневих елементів загального типу (СЕ № 10) змодельовано скінченоелементну схему структурної плити (рис. 1).

Для всіх моделей структурної плити прийнято шарнірне спирання по двом довгим сторонам (рис. 1, а). Робота конструкції під навантаженням є однонаправленою. З'єднання всіх стержньових елементів є шарнірним. Переріз для елементів всіх груп прийнято із труби безшовної гарячекатаної за ГОСТ 8732-78\*).

Оскільки ухил елементів верхнього поясу структури становить  $\alpha < 30^\circ$ , то прийнято розподіл снігового покриву як рівномірний по всьому покриттю.

Прийнято три типи завантаження: завантаження № 1 (постійне, власна вага структури), завантаження № 2 (постійне, власна вага конструктивних шарів покрівлі), завантаження № 3 (тимчасове, снігове навантаження).

*Аналіз результатів розрахунку.* На рис. 4 наведено графіки переміщень вздовж осі Z в поздовжньому перерізі після першого ітераційного розрахунку. На рис. 4, б наведено деформовану схему плити за моделлю № 1.

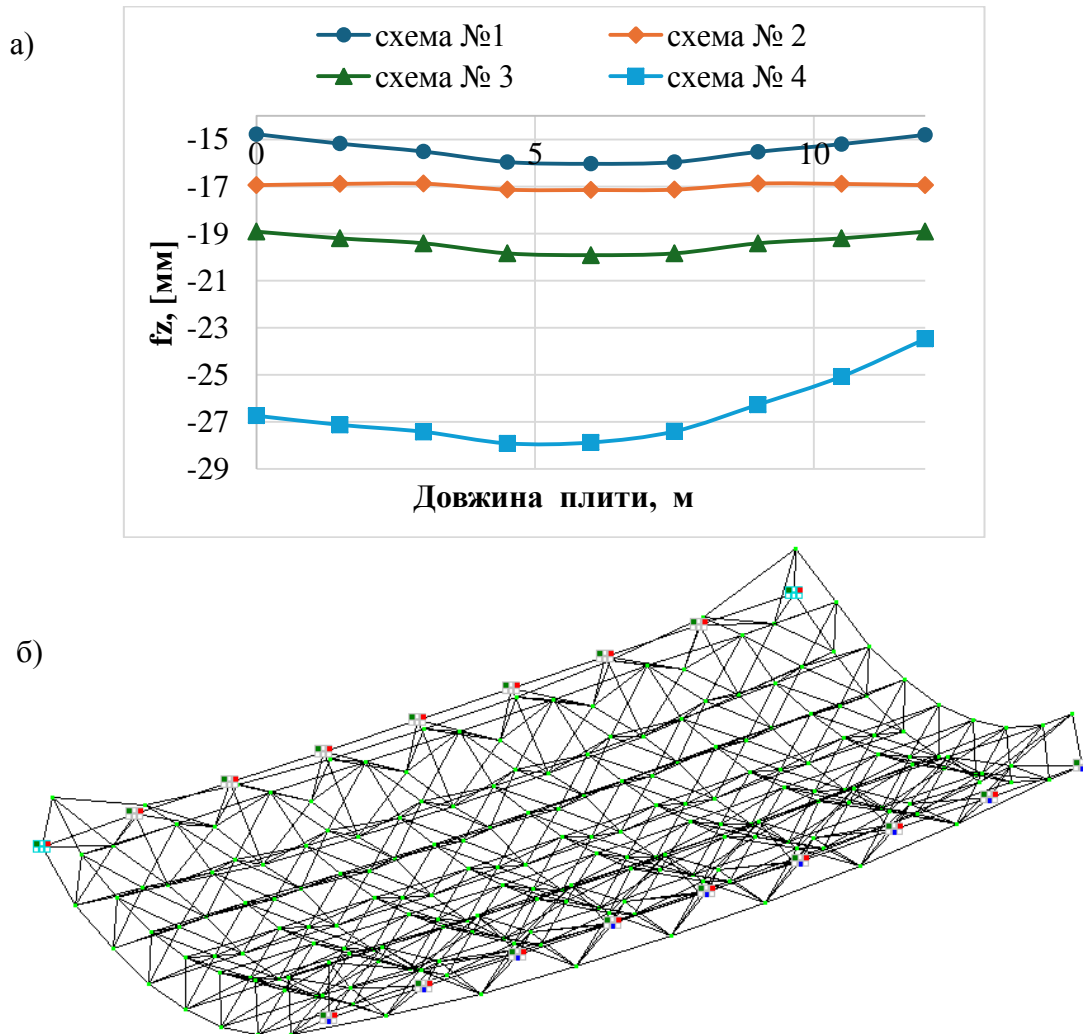


Рис. 4. Результати розрахунку за другою групою граничних станів:  
 а – переміщення вздовж осі Z в поздовжньому перерізі після 1-го ітераційного розрахунку;  
 б – деформована схема № 1 (плита товщиною 150 см) після 1-го ітераційного розрахунку

Очевидно, що з жорсткостями перерізів, прийнятими в першому наближенні, у всіх моделях деформативність є меншою за величину гранично допустимого прогину  $f_u=4,8$  см (рис. 4, а).

На основі зусиль, обчислених при жорсткостях 1-го типу (табл. 2), було визначено зусилля та деформації всіх моделей плит. На рис. 5 наведено епюри внутрішніх зусиль  $N$  для певних типів конструктивних груп стержнів для окремих схем плит від РСН2.

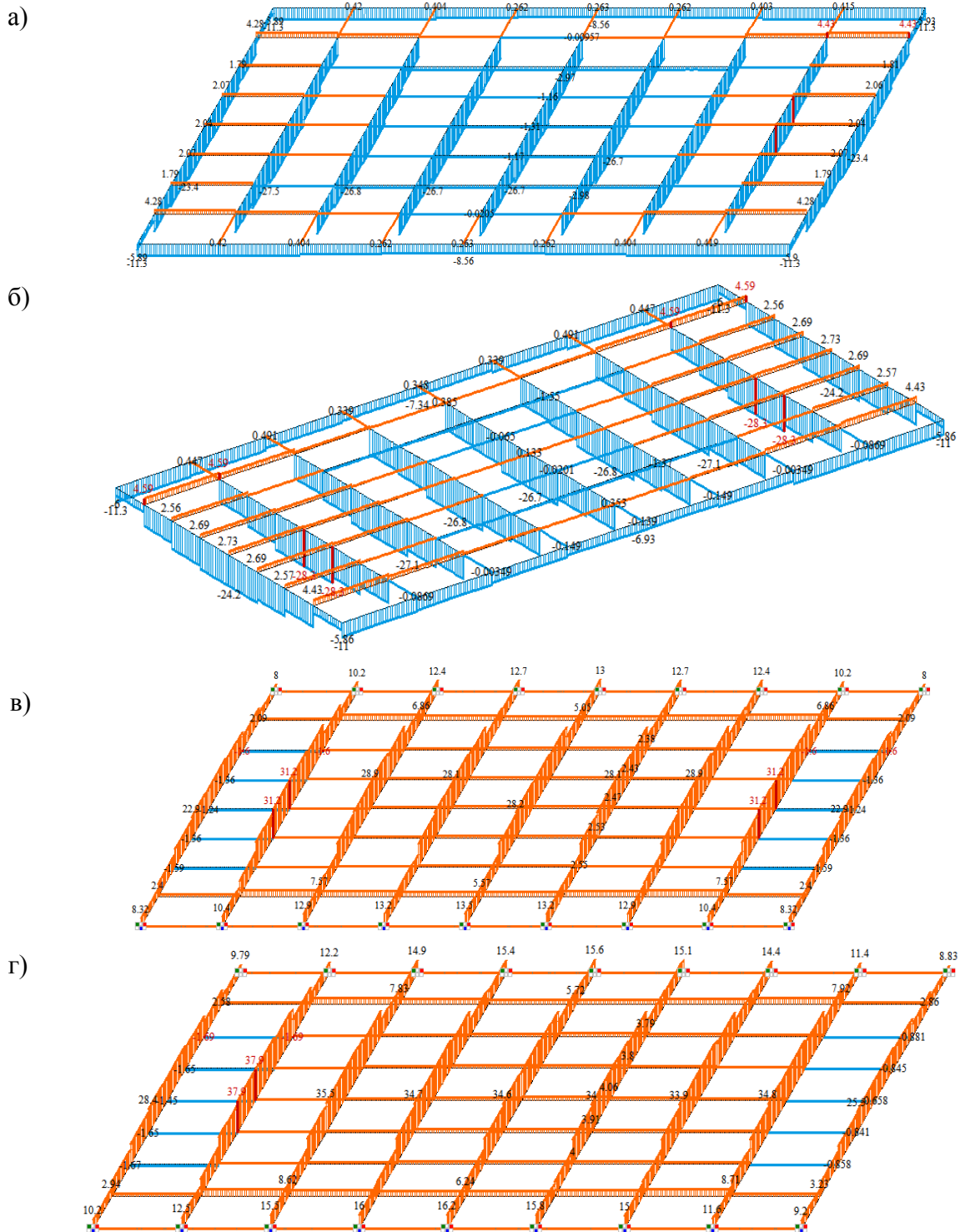


Рис. 5. Зусилля  $N$  у верхньому поясі структури після першого ітераційного розрахунку від РСН2: а – в схемі №1; б – в схемі №2; в – зусилля  $N$  у нижньому поясі структури після першого ітераційного розрахунку від РСН2 в схемі №3; г – в схемі №4

На основі результатів статичного розрахунку автоматизовано в модулі «Металеві конструкції» з урахуванням параметрів конструювання та згідно призначених параметрів матеріалу було перераховані нові розміри трубчатих перерізів елементів моделей структур. Розрахунок виконувався згідно норм [15] й за виконанням умов 1-ї т 2-ї груп граничних станів запропоновано нові профілі (табл. 2-4) для всіх конструктивних груп стержнів.

Таблиця 2 – Жорсткості елементів верхнього поясу, прийняті за результатами ітераційного розрахунку № 1

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	C235	ТБ102×4	0,00849859	324	2,75
2	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
3	C235	ТБ102×4	0,00849859	324	2,75
4	C235	ТБ127×4	0,0121285	324	3,93

Таблиця 3 – Жорсткості елементів нижнього поясу, прийняті за результатами ітераційного розрахунку № 1

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
2	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
3	C235	ТБ89×4,5	0,00937371	324	3,04
4	C236	ТБ108×5	0,0126955	324	4,11

Таблиця 4 – Жорсткості елементів решітки, прийняті за результатами ітераційного розрахунку № 1

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	C235	ТБ83×3,5	0,00685926	495,48	3,40
2	C235	ТБ83×3,5	0,00685926	484,2	3,32
3	C235	ТБ76×3	0,00539867	470,36	2,54
4	C235	ТБ89×3,5	0,00737694	461,64	3,41

Після призначення нових параметрів жорсткості для елементів плити (табл. 4), виконаємо другий ітераційний розрахунок. В таблиці 5 наведено дані щодо переміщень вузлів відносно осі Z в поперечному перерізі моделей плити після першої та другої ітерації.

Таблиця 5 – Переміщення  $f_z$  після 1-го та 2-го ітераційних розрахунків в поздовжньому перерізі

Проліт, м	Схема №1		Схема №2		Схема №3		Схема №4	
	Ітер. 1	Ітер. 2	Ітер. 1	Ітер. 2	Ітер. 1	Ітер. 2	Ітер. 1	Ітер. 2
0	-14,78	-36,33	-16,95	-45,05	-18,92	-52,68	-26,74	-55,79
3	-15,18	-38,92	-16,89	-46,02	-19,21	-54,66	-27,13	-57,35
6	-15,52	-41,23	-16,88	-47,25	-19,42	-56,58	-27,42	-59,04
9	-15,96	-43,16	-17,14	-48,58	-19,84	-58,57	-27,91	-60,64
12	-16,04	-43,67	-17,15	-48,91	-19,92	-59,06	-27,88	-60,87
15	-15,97	-43,17	-17,14	-48,58	-19,84	-58,57	-27,41	-59,67
18	-15,53	-41,26	-16,88	-47,25	-19,42	-56,58	-26,27	-56,76
21	-15,20	-38,97	-16,89	-46,02	-19,21	-54,66	-25,07	-53,14
24	-14,81	-36,40	-16,95	-45,05	-18,92	-52,68	-23,48	-48,93



На рис. 6 наведено максимальні переміщення вузлів  $f_z$  в скінченоелементних схемах за двох ітерацій.

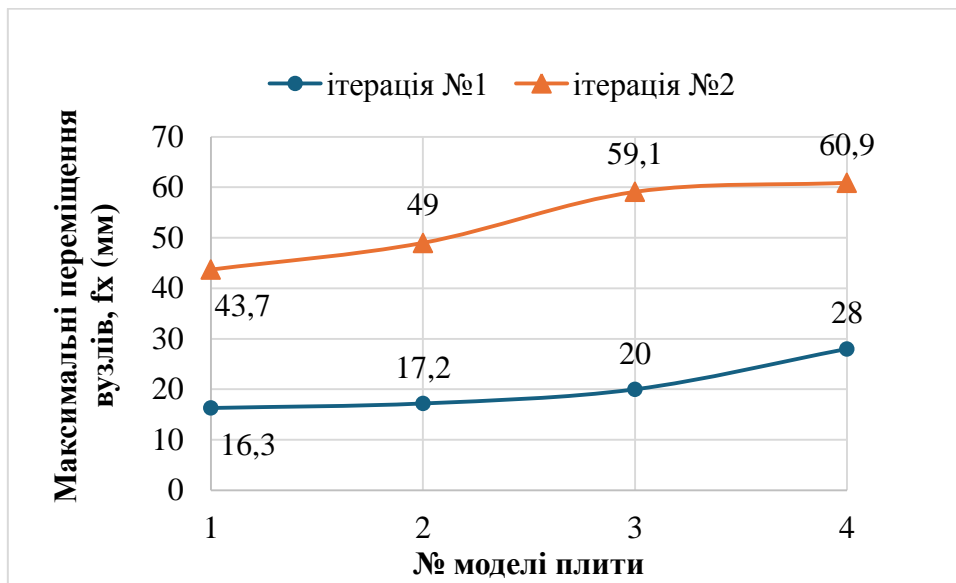


Рис. 6. Максимальні переміщення вузлів  $f_z$  в скінченоелементних схемах при двох ітераціях

Відсоток використання перерізів всіх груп конструктивних поясів за умовами першої групи граничних станів після другого ітераційного розрахунку в порівнянні з першим ітераційним розрахунком збільшилися від 20 % до 100 %.

Для кожної групи конструктивних елементів як уніфікований, єдиний профіль було прийнято максимальні діаметр профілю труби, запропонований в постпроцесорі «Металеві конструкції». Згідно нових профілів труби було підраховано вагу кожної конструктивної моделі. Підрахунок ваги моделей наведено в табл. 6-9.

Таблиця 6 – Вага схеми плити схеми №1

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
Верхній пояс	C235	ТБ102×4	0,00849859	324	2,75
Нижній пояс	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
Розкоси	C235	ТБ83×3,5	0,00685926	495,48	3,40
<b>Всього:</b>					<b>8,91</b>

Таблиця 7 – Вага схеми плити схеми №2

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
Верхній пояс	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
Нижній пояс	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
Розкоси	C235	ТБ83×3,5	0,00685926	484,2	3,32
<b>Всього:</b>					<b>8,83</b>

Таблиця 8 – Вага схеми плити схеми №3

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
Верхній пояс	C235	ТБ102×4	0,00849859	324	2,75
Нижній пояс	C235	ТБ89×4,5	0,00937371	324	3,04
Розкоси	C235	ТБ76×3	0,00539867	470,36	2,54
<b>Всього:</b>					<b>8,33</b>

Таблиця 9 – Вага схеми плити схеми №4

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
Верхній пояс	C235	ТБ127×4	0,0121285	324	3,93
Нижній пояс	C236	ТБ108×5	0,0126955	324	4,11
Розкоси	C235	ТБ89×3,5	0,00737694	461,64	3,41
<b>Всього:</b>					<b>11,45</b>

На рис. 7 наведено графічну ілюстрацію підрахунку ваги моделей плити в таблицях 6-9.

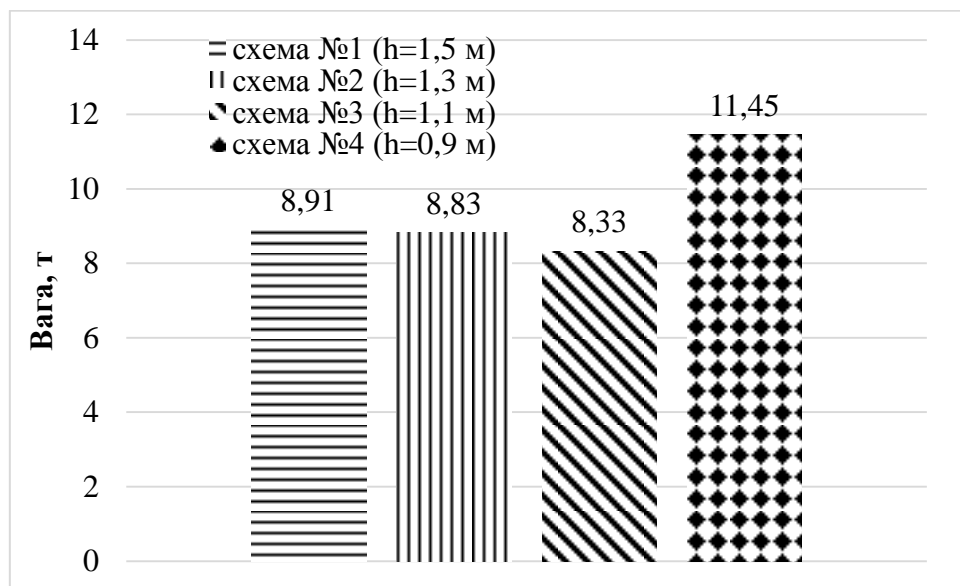


Рис. 7. Вага моделей структурної плити згідно нових розмірів перерізу, підібраних після 1-го ітераційного розрахунку

**Висновки.** Так, із таблиць 6–9 видно, що найменша вага буде у моделі № 3 з висотою в 1,1 м. Найбільшою вагою характеризується модель № 4 з висотою 0,9 м. Різниця у вазі цих плит з найменшою та найбільшою вагою становить 1,37 рази.

Отже, за критерієм матеріалоємності, найбільш ефективною з-поміж варіантів, що досліджувалися, є модель плити за схемою № 3.

Але, зважаючи на результати порівняння максимальних прогинів конструкції із гранично допустимими їх значеннями ( $f_u=4,8$  см), модель конструкції за схемою № 3 не задовольняє умовам перевірки за другою групою граничних станів. Отже, модель № 3 не може бути прийнята в якості одного із варіантів конструктивного рішення структурної плити.

Оскільки лише за умовою жорсткості прийнятною є схема № 1 (висота 1,5 м), то цю модель приймаємо як єдино можливу та найбільш ефективну.

**Перспективи досліджень.** На рис. 7 наведено максимальний відсоток використання перерізів за результатами другої ітерації, але відсоток кількості стержнів, що входить до такої групи з максимальним відсотком використання площі перерізу, є незначним (до 2 %).

Для більш детального і оптимального конструювання слід зробити ще декілька розрахункових ітерацій з метою, щоб якомога більший відсоток в конструктивних групах стержнів структури мав якомога повне використання площі перерізу.

Також, з метою більш точного конструювання, вже на другій ітерації слід за декількома діапазонами зусиль  $N$  сформувати групи стержнів, для яких було би прийнято відповідний новий профіль труби й провести декілька ітераційних розрахунків до моменту, коли у більшій кількості стержнів конструктивної групи відсоток використання перерізу буде значним (>50 %). Це дозволить суттєво зменшити вагу плити, хоча й збільшить кількість типорозмірів стержнів в усіх конструктивних групах стержнів.

### Література

1. Chilton J. Space Grid Structures. Routledge, 2007. URL: <https://doi.org/10.4324/9780080498188> (date of access: 16.04.2024).
2. The principle of space frame steel structure construction. *Space frame*. URL: <https://www.safsteelstructure.com/news/the-principle-of-space-frame-steel-structure-construction/> (date of access: 16.04.2024).
3. Space Frame Components of Space Frame System Types of Space Frame Advantages & Disadvantages of Space Frame Structure Space Frame Structures Examples. *CivilJungle*. URL: <https://civiljungle.com/space-structure/> (date of access: 16.04.2024).
4. Ashtul S.A., Patil S.N. Review on Study of Space Frame Structure System. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2020. Vol. 07, no. 04. P. 667–672. URL: <https://www.irjet.net/archives/V7/i4/IRJET-V7I4137.pdf> (date of access: 16.04.2024).
5. Facilitator C. Space Frame Structure; an analysis of its benefit - Constro Facilitator. *Constro Facilitator*. URL: <https://constrofacilitator.com/space-frame-structure-an-analysis-of-its-benefit/> (date of access: 16.04.2024).
6. Balke H. Räumliche Tragwerke. *Einführung in die Technische Mechanik*. Berlin, Heidelberg, 2010. P. 91–98. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10398-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10398-8_8) (date of access: 16.04.2024).
7. The Editors of Encyclopaedia Britannica. Space frame Steel Structures, Modular Design & Prefabrication. *Encyclopedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/technology/space-frame> (date of access: 16.04.2024).
8. Li Z. X. Structure Mechanics Analysis with Different Construction Schemes in Large-Span Space Grid Structure. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 788. P. 534–537. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.788.534> (date of access: 16.04.2024).
9. Construction process analysis for a single-layer folded space grid structure in considering time-dependent effect / Z. Zhou et al. *International Journal of Steel Structures*. 2012. Vol. 12, no. 2. P. 205–217. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-012-2005-y> (date of access: 16.04.2024).
10. Dzwierzynska J. Shaping of Spatial Steel Rod Structures Based on a Hyperbolic Paraboloid. *Archives of Civil Engineering*. 2018. Vol. 64, no. 4. P. 309–320. URL: <https://doi.org/10.2478/ace-2018-0076> (date of access: 16.04.2024).
11. Luo Y., Xue Y. Recent development and engineering practices of space grid structures in China. *International Journal of Space Structures*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1177/09560599241228934> (date of access: 16.04.2024).
12. Напружено-деформований стан структурної плити / N. Sribniak та ін. *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2020. № 2 (55). С. 35–43. URL: <https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2339>.

13. Determining the optimal size of the basic element in a space grid structure / L. Tsyhanenko et al. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*. 2023. Vol. 12, no. 2023.12. P. 201–208. URL: <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.22> (date of access: 16.04.2024).
14. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. На заміну СНиП 2.01.07-85; чинний від 2007-01-01. Вид. офіц. Київ : Мінбуд України, 2006. 14 с.
15. 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](https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=58106) (дата звернення: 16.04.2024).

### References

- [1] J. Chilton, *Space Grid Structures*. Routledge, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4324/9780080498188>. Accessed on: April 16, 2024.
- [2] The principle of space frame steel structure construction. *Space frame*. URL: <https://www.safsteelstructure.com/news/the-principle-of-space-frame-steel-structure-construction>. Accessed on: April 16, 2024.
- [3] Space Frame. *CivilJungle*. URL: <https://civiljungle.com/space-structure>. Accessed on: April 16, 2024.
- [4] S.A. Ashtul, S.N. Patil, "Review on Study of Space Frame Structure System", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 07, no. 04, pp. 667–672, 2020. [Online]. Available: <https://www.irjet.net/archives/V7/i4/IRJET-V7I4137.pdf>. Accessed on: April 16, 2024.
- [5] C. Facilitator, Space Frame Structure; an analysis of its benefit – Constro Facilitator. *Constro Facilitator*. URL: <https://constrofacilitator.com/space-frame-structure-an-analysis-of-its-benefit>. Accessed on: April 16, 2024.
- [6] H. Balke, *Räumliche Tragwerke, Einführung in die Technische Mechanik*. Berlin, Heidelberg, 2010. pp. 91–98. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10398-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10398-8_8). Accessed on: April 16, 2024.
- [7] The Editors of Encyclopaedia Britannica. Space frame Steel Structures, Modular Design & Prefabrication. *Encyclopedia Britannica*. [Online]. Available: URL: <https://www.britannica.com/technology/space-frame>. Accessed on: April 16, 2024.
- [8] Z.X. Li, "Structure Mechanics Analysis with Different Construction Schemes in Large-Span Space Grid Structure", *Advanced Materials Research*, vol. 788, pp. 534–537, 2013. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.788.534>. Accessed on: April 16, 2024.
- [9] Z. Zhou et al., "Construction process analysis for a single-layer folded space grid structure in considering time-dependent effect", *International Journal of Steel Structures*, vol. 12, no. 2, pp. 205–217, 2012. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-012-2005-y>. Accessed on: April 16, 2024.
- [10] J. Dzwierzynska, "Shaping of Spatial Steel Rod Structures Based on a Hyperbolic Paraboloid", *Archives of Civil Engineering*, vol. 64, no. 4, pp. 309–320, 2018. URL: <https://doi.org/10.2478/ace-2018-0076>. Accessed on: April 16, 2024.
- [11] Y. Luo, Y. Xue, "Recent development and engineering practices of space grid structures in China", *International Journal of Space Structures*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1177/09560599241228934>. Accessed on: April 16, 2024.
- [12] N. Sribniak et al., "Napruzeno-deformovani stan strukturnoi plyty", *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*, no. 2 (55), pp. 35–43, 2020. URL: <https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2339>. Accessed on: April 16, 2024.
- [13] L. Tsyhanenko et al., "Determining the optimal size of the basic element in a space grid structure", *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, vol. 12, no. 2023.12, pp. 201–208, 2023. URL: <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.22>.

Accessed on: April 16, 2024.

- [14] DSTU B V.1.2-3:2006. Prohyny i peremishchennia. Vymohy proektuvannia. Na zaminu SNyP 2.01.07-85. Vyd. ofits. K: Minbud Ukrainy, 2006.
- [15] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruksii. 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. Vyd. ofits. K: Minrehion Ukrainy, 2014. URL: [https://budstandart.ua/normativ-document.html?id\\_doc=58106](https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=58106). Accessed on: April 16, 2024.

### STRUCTURAL SLAB OPERATION STUDY

<sup>1</sup>**Sribniak N.M.**, Ph.D., Associate Professor,  
nataliya.sribnyak.17@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3205-433X

<sup>1</sup>**Tsyhanenko L.A.**, Ph.D., Associate Professor,  
tsyhanenkola@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6628-3635

<sup>1</sup>**Halushka S.A.**, Senior Lecturer,  
galushka\_sa@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2789-8570

<sup>1</sup>**Tsyhanenko H.M.**, Senior Lecturer,  
tsyhanenkogm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3335-4804

<sup>1</sup>*Sumy National Agrarian University*  
Gerasima Kondratieva st., 160, Sumy, 40000, Ukraine

**Abstract.** A number of factors affect the redistribution and value of axial forces in the cores of structural slabs, such as the location and quantity of supports, the presence or absence of prestress in the structure, the shape of the base crystal of the slab, which is the forming element, and the height (thickness) of the slab, which can be varied within certain permissible limits. A change in one of these features with the rest of the parameters remaining unchanged significantly changes the stress-strain state of the structure. The paper describes the description of finite element models of a structural grid slab with a plan dimension of 12.0×24.0 m. Four models of the slab are adopted, differing only in one parameter – the thickness of the structure. The following values of the structure height were adopted: 1.5 m (model No. 1), 1.3 m (model No. 2), 1.1 m (model No. 3), 0.9 m (model No. 4). The analysis and design of all models were performed, which were accepted. New profiles of the structural groups of rods were selected so that they met the check conditions for the first and second groups of limit states and the percentage of rod cross-section utilisation was as high as possible. The maximum deflections of the models after the analysis were compared. The lowest weight as an optimality criterion is the most common criterion for structures, in particular metal structures, as this criterion is quite easy to formalise.

The weight of each slab model was calculated and it was found that the optimal design solution is model No. 1 with a height of 1.5 m, since only for this model the deformability is within the permissible limits. The model characterised by the lowest weight is model No. 3, but the maximum vertical deflection of this structure is greater than the maximum limit.

In conclusion, the analysis of the displacements of the slab model nodes revealed that only the maximum deflection of the slab in model No. 1 does not exceed the maximum permissible deflection of 4.8 cm. The maximum deflections in models No. 2, 3, 4 exceed the maximum permissible value of the absolute deflection. Consequently, the check condition for the second group of limit states is not met in models 2, 3, and No. 4, and model No. 3, which has the lowest weight, cannot be recognised as the most effective among the others. Considering the condition of sufficient stiffness, the optimal design solution is model No. 1. The difference in weight between model No. 1 (8.9 tonnes) and model No. 3 (8.33 tonnes) with the lowest weight is 6.8 %.

**Key words:** space grid slab structure, plate thickness, material capacity, force regulators.

Стаття надійшла до редакції 26.04.2024