

УДК 624.074.5

О. І. Сіянов, канд. техн. наук, доц.

## ВПЛИВ РОЗТАШУВАННЯ ОПОРНИХ ФЕРМ НА РОБОТУ МЕТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СІТЧАСТИХ ПОКРИТТІВ

Використовуючи прикладні програмні засоби, виконано моделювання та скінченно-елементний розрахунок металевих циліндричних сітчастих покриттів з горизонтальними і вертикальними фермами. Проаналізовано стан роботи запропонованих систем у разі дії небезпечних несиметричних навантажень. Виявлено тенденції розподілу розрахункових параметрів і встановлено раціональну схему покриття.

### Вступ

У сучасному будівництві раціональними багатоеlementними конструкціями вважаються металеві циліндричні сітчасті покриття. Їх форма має привабливий зовнішній вигляд і дозволяє перекривати великі об'єкти різного призначення [1—7]. Завдяки унікальній просторовій структурі кожний елемент таких систем сприймає діюче навантаження, тобто є задіяним в роботі. Причому одні елементи працюють досить активно, інші — майже ненавантажені [8]. Так створюються окремі ділянки з нерівномірними переміщеннями характерних вузлів. Ця ситуація формує проблему, яка особливо проявляється тоді, коли проектувальники невиправдано збільшують розміри конструкцій, ігнорують рекомендованим дотриманням співвідношень геометричних параметрів, помилково розраховують навантаження.

В науковій літературі [1, 3, 6, 9] описані практичні підходи, спрямовані на забезпечення рівномірності роботи покриттів, зменшення відповідних силових факторів і параметрів деформування. Деякі джерела [3, 5—8, 10—19] вказують на необхідність прийняття конкретних конструктивних заходів, спрямованих на використання додаткових елементів, розташованих переважно в опорних ділянках покриттів. Однак виявлені пропозиції через складність поставленої на той час задачі мали лише часткову реалізацію і залишилися без підтвердження їхньої результативності. У запропонованій статті виконано побудову скінченно-елементних моделей, здійснено комп'ютерні розрахунки, отримано і проаналізовано числові параметри силової роботи покриттів з можливими схемами підкріплення опорних ділянок.

### Визначальні положення

Для досліджень вибрано схему покриття з розмірами в плані  $B \times L = 24 \times 30$  м і висотою (стрілою підйому)  $f = 6,93$  м в межах рекомендованих [3, 6] співвідношень геометричних параметрів. Сітчаста поверхня сформована системою перехресних ребер з діагональними елементами між ними. Кут описаного кола покриття зафіксовано на рівні  $\alpha = 120^\circ$ . Відстань між вузлами у поздовжньому і поперечному напрямках однакова з утворенням прямокутних чарунок, поділених розкосами на суміжні трикутники. Відповідно отримана така ж сама кількість граней уздовж дуги і кількість панелей за напрямком довжини покриття ( $n = m = 8$ ) (рис. 1). Елементам задано фасонний трубчастий профіль. Матеріал стержнів — сталь класу С235 (розрахунковий опір  $R_y = 230$  МПа) і марки ВСтЗпс. Обпирання вузлових з'єднань по контуру — шарнірне. Геометрична незмінність системи забезпечена опорним закріпленням по вертикалі (ось  $Z$ ), повною заборороною переміщень в одній кутовій точці (осі  $X, Y, Z$ ) і частковим накладанням в'язей за

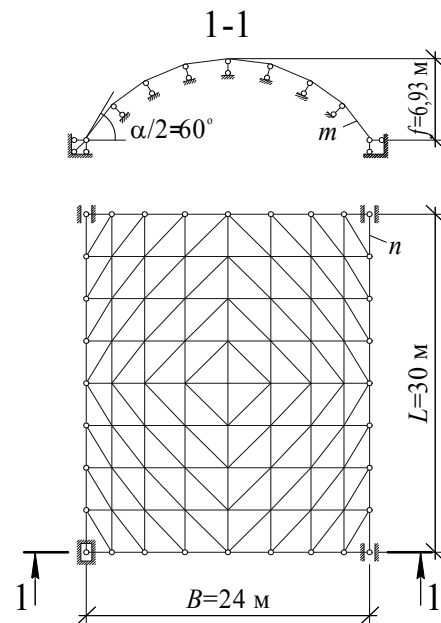


Рис. 1. Схема покриття з геометричними параметрами

напрямами осей  $X, Z$  в решті кутових точок.

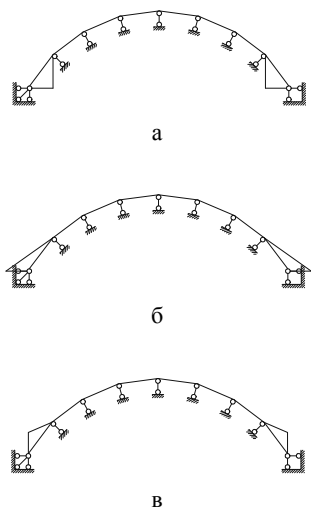


Рис. 2. Можливі схеми підкріплення покриття опорними фермами

Рівномірність роботи покриття вирішено отримати шляхом використання опорних ферм, приєднаних до нижніх ребер просторової конструкції. Ферми розміром  $2,2 \times 30$  м розташовані в горизонтальному і вертикальному напрямках, а їх сітка конструктивно відповідала граням покриття. Кожна опорна ферма прикріплена до несучої системи десятьма стержнями із арматурної сталі і встановлена згідно з рис. 2. Матеріал і профіль для виготовлення елементів ферм вибрані такі самі, як для стержнів сітчастої поверхні покриття.

Власна вага конструкції визначена на підставі отриманої інформації про призначені характеристики жорсткості елементів. Навантаження від шару снігу і вітрового тиску розраховані за чинними нині нормативними документами [20]. Визначені у такий спосіб зовнішні розподілені тиски переведені через розраховані вантажні площі у зосереджені вузлові сили.

### Скінченно-елементне моделювання і розрахунок

Ідеалізована циліндрична сітчаста система представлена у вигляді трьох спрощених скінченно-елементних моделей покриття, побудованих методом обертання поверхонь у прикладному обчислювально-

му комплексі SCAD [21].

Жорсткість кожного елемента задано із наявного програмного сортаменту шляхом вибору і призначення раціонального сталевго профілю. Елементи систем і опорних ферм змодельовані з труб в гарячекатаному безшовному варіанті.

Для з'єднання несучих і підкріплювальних конструкцій використано круглий сталевий сортовий прокат.

Загальну незмінність геометричної форми забезпечено в'язями, накладеними на контурні опорні вузли

$$X = Y = Z = 0; \quad X = Z = 0; \quad Z = 0.$$

Власна вага покриття отримана на підставі програмного призначення елементам характеристик жорсткості. Розподілені снігове і вітрове навантаження переведено через вантажні площі в зосереджені сили, прикладені у вузлах

$$F_1 = qA_1 = 0,25 qlh; \quad F_2 = qA_2 = 0,5 qlh; \quad F_3 = qA_3 = qlh,$$

де  $q = 2 \text{ кН/м}^2$  — результат суми власної ваги, дії снігу і вітру;  $A_1, A_2, A_3$  — вантажні площі в окремих ділянках сітчастої поверхні;  $l = 3,75$  м,  $h = 3,6$  м — розміри чарунок уздовж довжини і дуги покриття, відповідно.

Розрахунок здійснено для схеми покриття, підкріпленої опорними фермами у горизонтальному і вертикальному напрямках. Причому контурні ребра використано у вигляді поясів підкріплюючих граней, що передбачало горизонтальне розташування опорних ферм як всередину, так і назовні, а вертикальне — лише назовні.

Кожна підкріплена система покриття оцінена за ступенем активності силової роботи і уразливістю до деформацій.

Раціональність схеми розташування опорних ферм визначена отриманими внутрішніми поздовжніми силами в елементах, виявленими лінійними переміщеннями вузлів та рівномірним їх розподілом по поверхні.

### Розрахункові параметри і результати

Внаслідок виконаних розрахунків отримано і проаналізовано деформовані схеми покриття, характерні мозаїки зусиль і переміщень, епюри внутрішніх силових факторів. За розрахунковими параметрами виявлено уразливість окремих ділянок сітчастої поверхні з урахуванням можливих схем поздовжнього підкріплення і визначено закономірності та максимальні показники роботи покриття під навантаженням. Крім того, оцінено вплив розташування опорних ферм на поведінку покриття.

Зокрема загальний стан підкріплених систем показав схожі тенденції розподілу зусиль і пере-

мішень за умови дії небезпечних несиметричних навантажень.

Максимальні поздовжні сили зафіксовано в середніх елементах опорних ребер нижніх граней, а найбільші переміщення отримав рівновіддалений від торців вузол середніх ребер.

Із розглянутих схем підкріплення досить істотно вплинуло на роботу покриття горизонтальне розташування опорних ферм, причому не всередину, а назовні. Спрямовані від центра прогону додаткові грані надали більшої жорсткості із площини покриття у поперечному напрямку. З використанням такого виду підкріплення зафіксовано достатньо рівномірний розподіл зусиль по поверхні і досягнуто значного зменшення максимальних силових факторів та параметрів деформування. Крім того, за рахунок введення зовнішніх горизонтальних ферм скорегована зміна форми покриття, про що свідчить центральне переміщення, яке виявлено в нижньому ребрі грані ділянки гребеня. Разом з тим, майже однаковий за величиною, але протилежний за напрямком вплив на роботу системи мають два інші види підкріплення. Зокрема, найуразливішим для покриття виявилось зовнішнє розташування опорних ферм, спрямованих у вертикальному напрямку. Саме така схема характеризувалась близькими за величиною максимальними зусиллями розтягу і стиску та відмінним від інших схем місцем їх розташування.

Показані на рис. 3 діаграми дозволяють наочно порівняти максимальні показники роботи підкріплених систем.

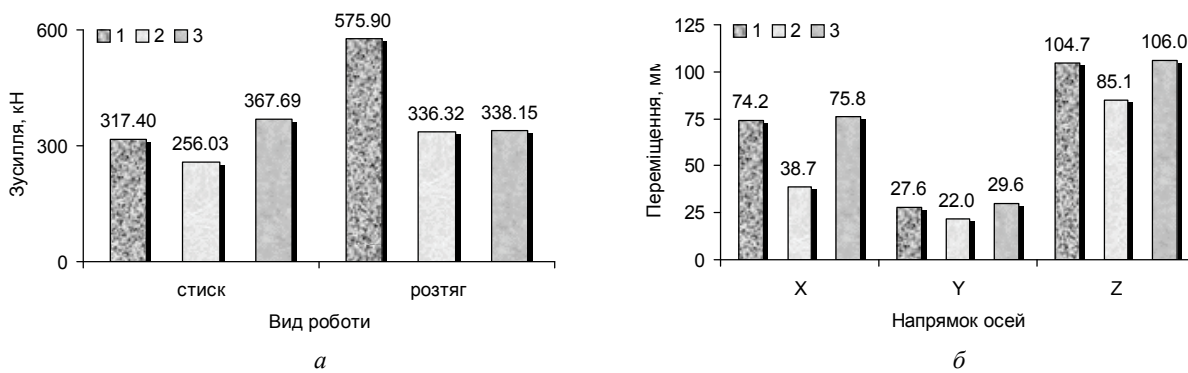


Рис. 3: а — максимальні зусилля в елементах; б — максимальні переміщення вузлів покриття, підкріпленого:  
1 — горизонтальними фермами всередину; 2 — горизонтальними фермами назовні;  
3 — вертикальними фермами назовні

Із отриманих результатів видно, що найбільші зусилля зафіксовано переважно в розтягнутих елементах за винятком покриття з опорними фермами, розташованими у зовнішньому вертикальному напрямку. Зіставлення максимальних зусиль різних знаків для кожної підкріпленої системи показало нерівномірність роботи найнавантажених елементів. Особливо сильний перепад виявлено в схемі покриття з горизонтальними фермами, орієнтованими всередину прогону. Як наслідок відмічена тенденція призвела до одностороннього викривлення підкріплених систем і значного переміщення уразливих вузлів. Зі всіх можливих напрямків роботи конструкції у просторі найбільшої зміни незалежно від розташування опорних ферм зазнала геометрія покриття за напрямком вертикалі. Поперечне розповзання і поздовжній рух систем не так суттєво вплинули на схему загального деформування. Втім, уздовж довжини покриття, підкріпленого зовнішніми горизонтальними фермами, зафіксовано протилежний напрямок, іншу ділянку і меншу величину максимального переміщення вузлів. За даними проведених розрахунків виявлено, що саме в такій схемі параметри деформування мають досить прийнятний результат з позицій забезпечення потрібної жорсткості та загальної стійкості конструкції.

### Висновки

1. У статті розглянуто основні принципи формоутворення, побудовано комп'ютерні моделі та виконано скінченно-елементний розрахунок металевих циліндричних сітчастих покриттів з можливими схемами підкріплення опорних ділянок за напрямком довжини.

2. Досліджено результати використання у складі покриття горизонтальних і вертикальних ферм, орієнтованих всередину або назовні, що мають єдине ребро із нижньою гранню сітчастої поверхні та об'єднані у просторову систему за допомогою арматурних стержневих підвісок.

3. Проведено ґрунтовний аналіз силових факторів і параметрів деформування трьох запропонованих випадків підкріплення та встановлено раціональну схему покриття за умови прикладання небезпечних несиметричних навантажень.

4. Виявлено уразливі ділянки з максимальними поздовжніми силами в елементах і найбільшими переміщеннями вузлів, а також тенденції розподілу розрахункових параметрів підкріплених покриттів.

5. Зафіксовано істотне розвантаження несучої системи з розташованими назовні горизонтальними фермами і визначено майже однаковий за величиною, але протилежний за напрямком вплив на роботу покриття двох інших видів підкріплення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Патцельт О. Стальные решетчатые пространственные конструкции / О. Патцельт ; пер. с нем. — М. : ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. — 95 с.
2. Рюле Г. Пространственные покрытия. Конструкции и методы возведения / Г. Рюле ; пер. с нем. — Том 2. — М. : Стройиздат, 1974. — 247 с.
3. Свердлов В. Д. Исследование пространственных цилиндрических стержневых систем покрытий : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Свердлов Владимир Деонисович. — К., 1977. — 174 с. — Библиогр. : С. 153—161.
4. Трущев А. Г. Пространственные металлические конструкции : учеб. пос. для вузов. / А. Г. Трущев. — М. : Стройиздат, 1983. — 215 с.
5. Инженерные конструкции : учеб. для вузов / [В. Н. Голосов, В. В. Ермолов, Н. В. Лебедева и др.] ; под ред. В. В. Ермолова. — М. : Высш. школа, 1991. — 408 с.
6. Свердлов В. Д. Металеві циліндричні стержневі покриття : моногр. / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 134 с.
7. Сіянов О. І. Металеві одношарові циліндричні стержневі покриття : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Сіянов Олександр Іллч. — К., 2002. — 200 с. — Библиогр. : С. 181—194.
8. Сіянов О. І. Визначення силових факторів і параметрів деформування металевих циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 1. — С. 20—25.
9. А. с. СССР 1649060 А1 SU. МКИ Е 04 В 7/08. Решетчатый свод / В. Х. Лапса. — № 691538 ; заявл. 23.02.89; опубл. 15.05.91, Бюл. № 18. — 5 с.
10. Попов И. Г. Цилиндрические стержневые системы / И. Г. Попов. — Л.; М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. — 112 с.
11. Свердлов В. Д. Совершенствование цилиндрических стержневых систем покрытий / В. Д. Свердлов, А. И. Сіянов // Теория и практика металлических конструкций : тр. Междунар. конф., (Донецк-Макеевка, 2–4 декаб. 1997 г.). — Донецк-Макеевка, 1997. — Т. 2. — С. 37—41.
12. Свердлов В. Д. Проблема стійкості одношарових циліндричних стержневих покриттів / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов, О. Д. Бойчук // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. науч. трудов. — Одесса : ОГАСА, 1999. — С. 169—174.
13. Свердлов В. Д. Одношарові циліндричні стержневі покриття (перспективи, проблеми, шляхи вирішення) / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов // Індивідуальний житловий будинок : матер. респуб. наук.-техн. конф., (Вінниця, 25–27 верес. 2001 р.). — Вінниця. — 2001. — С. 10—14.
14. Сіянов О. І. Теоретичні та експериментальні дослідження одношарових циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2001. — № 3. — С. 13—18.
15. Сіянов О. І. Аналіз конструктивних рішень металевих одношарових циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. — Рівне : НУВГП, 2004. — Вип. 11. — С. 279—282.
16. Свердлов В. Д. Результати оптимізаційних розрахунків звичайних і підкріплених одношарових циліндричних стержневих покриттів / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : зб. наук. праць. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — С. 93—96.
17. Свердлов В. Д. Напрямки удосконалення металевих циліндричних стержневих покриттів / В. Д. Свердлов, О. І. Сіянов : сб. док. VIII Украинской науч.-техн. конф. «Металлические конструкции : взгляд в прошлое и будущее», (Киев, 18–22 октяб. 2004 г.). — Киев : изд-во «Сталь», 2004. — Ч. 2. — С. 18—20.
18. Сіянов О. І. Розрахунок одношарових циліндричних стержневих покриттів / О. І. Сіянов, Б. В. Погрішук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2005. — № 1. — С. 13—15.
19. Сіянов О. І. Дослідження схем розташування хрестоподібних в'язей одношарового циліндричного стержневого покриття / О. І. Сіянов // Промислове будівництво та інженерні споруди. — 2012. — № 1. — С. 13—15.
20. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи / Мінбуд України. — К. : вид-во «Сталь», 2006. — 60 с.
21. Вычислительный комплекс SCAD / [В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко та ін.]. — М. : изд-во «СКАД СОФТ», 2009. — 656 с.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва

Стаття надійшла до редакції 5.09.2012  
Рекомендована до друку 15.10.12

**Сіянов Олександр Іллч** — доцент кафедри промислового та цивільного будівництва.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця