

УДК 624.012

## **Особливості технічного та напружено-деформованого стану вантового покриття кіноконцертної зали «Україна» в м. Харків**

**Кордун О. І., Лимар Я. В.**

Український інститут сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського, Україна

**Анотація.** В статті розглянуто результати натурного обстеження і проблеми моделювання оболонкового покриття двоякої кривини кіноконцертної зали «Україна» в м. Харків, вул. Сумська, 35. Покриття являє собою вантово-оболонкову конструкцію двоякої кривини, основними елементами якої є несні ванти, закріплені до масивних похилих залізобетонних арок. Несні ванти виконано з пучка паралельних сталевих стрижнів діаметром 5 мм. Для забезпечення форми двоякої кривини несні ванти стягнуто формують формуючими тросами. На несні ванти укладено збірні залізобетонні тонкостінні плити покриття. Стиги між плитами покрито бетоном. Поверх плит покриття укладено теплоізолювальні матеріали і цементно-піщану стяжку. Висяче покриття опирається тільки по контуру арок, проміжні опори відсутні.

Для визначення зусиль у несних вантах в розрахунковому комплексі SCAD Soft розроблено скінченно-елементну модель. Координати вузлів скінченно-елементної моделі визначені аналітично, виходячи з умов рівноваги вузлів у вертикальному напрямку, і скориговані за результатами геодезичних вимірювань відміток покрівлі існуючої конструкції.

Дослідження напружено-деформованого стану виконується в геометрично нелінійній постановці задачі з урахуванням попереднього напруження несних і формують формуючих вант.

**Ключові слова:** скінченний елемент, період коливань, нелінійний розрахунок.

### **Вступ**

Висячі покриття набули широкого застосування в 50-х роках ХХ століття. Одним із яскравих представників подібних будівель на території України є кіноконцертна зала «Україна» в м. Харків із висячим збірним залізобетонним покриттям двоякої кривини (рис. 1). Кіноконцертна зала розрахована на 1780 глядачів, а загальна площа приміщень комплексу складає 2200 м<sup>2</sup>. Будівлю кіноконцертної зали «Україна» включено до списку пам'яток архітектури.

Покриття кіноконцертної зали «Україна» в м. Харків, вул. Сумська, 35, являє собою вантово-оболонкову конструкцію двоякої кривини. Покриття спирається на дві залізобетонні арки параболічного обрису прольотом 48 м, що мають спільні опори. Арки нахилені до горизонту під кутом 12° (похила арка) і під кутом 45° (крута арка). По довжині арки опираються на збірні залізобетонні стійки. По контуру арок закріплено несні ванти, на які укладено збірні залізобетонні елементи оболонки покриття. Висяча оболонка покриття закріплена тільки по контуру арок, проміжні опори відсутні. Основними елементами покриття є несні паралельні ванти, натягнуті між арками. Несні ванти виконані з пучка паралельних стрижнів діаметром 5 мм із високоміцної

сталі. Кількість високоміцних стрижнів у вантах змінна і в гребеневій зоні становить 17 стрижнів, а в зоні карнизу – 10. Для забезпечення форми двоякої кривини несні ванти стягнуто поперечними формуючими тросами. Сітка несних вант і формуючих тросів формує архітектурно виразне покриття у вигляді гіперболічного параболоїда.



Рис. 1. Фасад кіноконцертної зали «Україна», м. Харків

До несних вант підвішені збірні залізобетонні тонкостінні плити покриття, стики між плитами покриті бетоном. Плити мають розмір у плані 2020×930 мм, товщину 30 мм і виконані у вигляді консольно-балкових плит із жолобами для несних вант. Для кріплення панелей до несних вант у жолобах замонолічено шпильки-хомути U-подібної форми (рис. 2). Поверх плит покриття укладено теплоізоляційні матеріали та цементно-піщану стяжку [1].

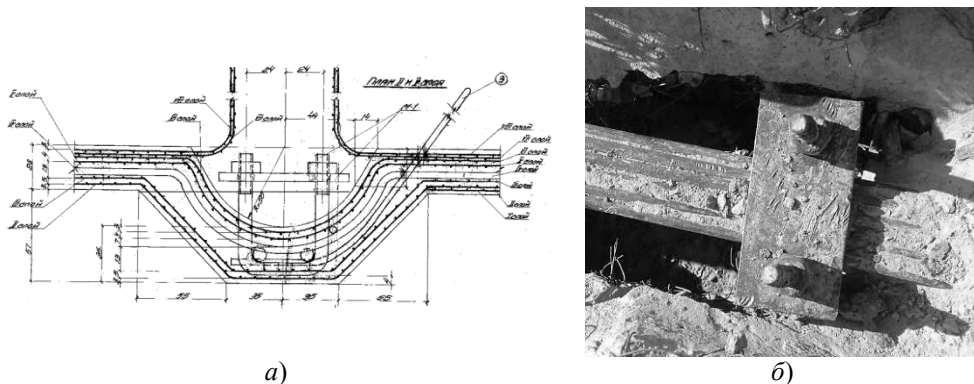


Рис. 2. Вузол підвіски плит покриття до несних вант:

*а* – креслення вузла кріплення; *б* – очищений від бетону вузол підвіски плит покриття

Враховуючи значний термін експлуатації, технічну складність конструкції покрівлі, розташування будівлі над тунелем метрополітену та виконану раніше заміну шару теплоізоляційного покриття, виникла необхідність виконати комплекс робіт із оцінки технічного стану та підтвердження придатності для подальшої експлуатації. У складі робіт, крім обстеження і натурних випробувань, також було передбачено проведення науково-технічного супроводу, що включає геометрично нелінійний розрахунок, дослідження напружено-деформованого стану і визначення динамічних характеристик існуючої конструкції покриття.

### **Візуальне обстеження покриття**

Для візуального обстеження на покрівлі було підготовано три ділянки, на яких знято теплоізоляційний килим, а несні ванти частково очищено від бетону і зроблено доступними для огляду як ззовні, так і зсередини приміщення (рисунки 3, 4). Під час візуального обстеження на вантах виявлено наявність поверхневої корозії в межах 5–10 %.



*a)*

*б)*

Рис. 3. Несна ванта покриття ККЗ «Україна» в гребеневій зоні:  
*a* – несна ванта в анкерній зоні з'єднання з аркою; *б* – вузол перетину ванти із стягуючими тросами, вид із приміщення глядацької зали

Також на покрівлі було виявлено сповзання теплоізоляційного килиму в напрямку від крутої арки. Причиною сповзання є втрата зчеплення із основою через систематичне замокання і дію атмосферної вологи.

Під час огляду з боку глядацької зали чітко проглядають сліди затікання води і замокання бетонних плит. Підвісна стеля глядацької зали кріпиться за допомогою дерев'яних брусків, закріплених у спеціальних підвішених до несних вант сталевих закладних деталях.

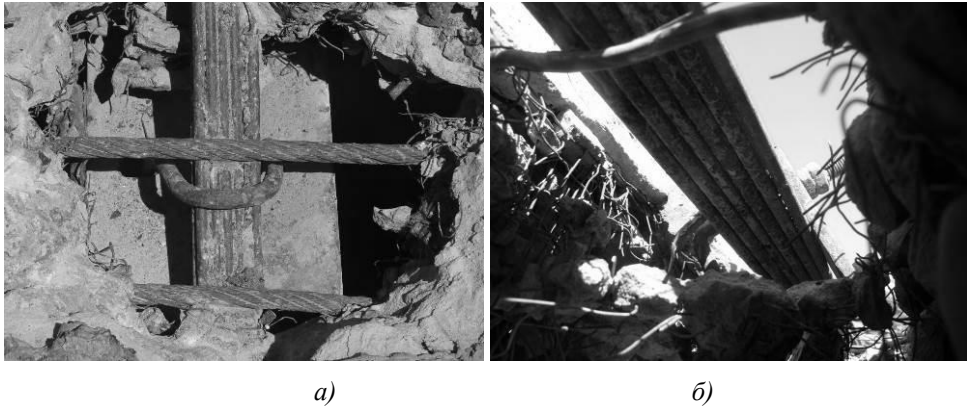


Рис. 4. Несні та другорядні елементи покриття ККЗ «Україна»: а – вузол перетину ванти зі стягуючими тросами і деталь кріплення підвісної стелі; б – несна ванта, вид із глядацької зали

Спеціалістами Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова було виконано сканування покриття зсередини глядацької зали. Сканування поверхонь оболонки покриття виконувалося сканувальним тахеометром марки Trimble XS10 із двох точок. Роботи виконувалися за принципом смугового сканування за допомогою призми, що обертається в оглядовій трубі. Швидкість сканування приладу складає до 26 600 точок/с на відстані до 600 м, і найменша розбіжність лазерного променя складає 14 мм/100 м. За такого режиму роботи щільність точок складає до 10 000 на 1 м<sup>2</sup>, а досягнута точність вимірювань – 0,2 мм.

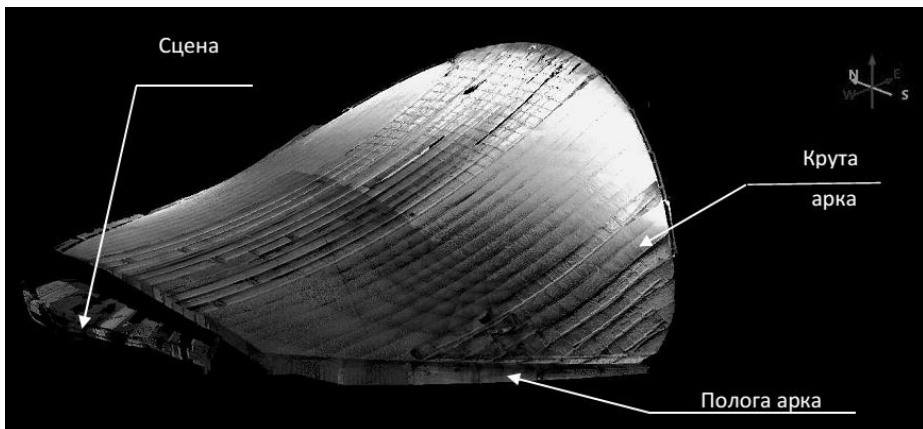


Рис. 5. Просторова модель покриття на основі сканування тахеометром

В результаті виконання роботи були отримані зображення 3D-масиву точок стелі ККЗ «Україна». Отримані дані після додаткової обробки використовувалися для побудови плану стелі, створення цифрової тривимірної моделі, окремих об'єктів (балок, колон тощо), для визначення площі стелі або окремих конструкцій під час діагностування і виконання оцінки стану покриття і будівлі в цілому.

### **Скінченно-елементна модель**

Окремою задачею моделювання покриття є визначення початкової форми покриття та координат вузлів перетину несних вант і стягуючих тросів. Для вирішення цієї задачі застосовано аналітичний метод, в основу якого покладено умову рівноваги вузлів у вертикальному напрямку [2, 3]. Детальніше задача формоутворення вантових конструкцій і визначення координат вузлів розглянута в статті.

Під час створення скінченно-елементної моделі вантового покриття необхідно розглядати фактичну конфігурацію вантових і оболонкових елементів, з урахуванням початкової форми і залишкових деформацій, що виникли за довгий час експлуатації. Визначені теоретично координати вузлів перетину несних вант і стягуючих тросів скориговані за даними геодезичних обмірів покрівлі існуючої конструкції і враховані в скінченно-елементній моделі.

Моделювання і визначення динамічних характеристик конструкції покриття виконано в програмному комплексі SCAD Soft, версія програмного забезпечення SCAD Soft 21.1.5.1. Похилі залізобетонні арки з поперечним перерізом 2000×500 мм змодельовані стрижневими скінченними елементами (СЕ) типу 5 «універсальний просторовий стрижневий елемент». Арки покриття закріплені від переміщень у вертикальній площині в точках обпирання на колони. Вузол обпирання на фундамент пологої і крутої арок закріплений від лінійних переміщень по всіх трьох напрямках.

Залізобетонні плити покриття змодельовані плоскими оболонковими скінченними елементами типу 42 «трикутний елемент оболонки». Згинальна жорсткість (EI) оболонкових елементів відповідає реальній жорсткості плит покриття. Під час моделювання і розрахунку взято до уваги низьку міцність бетонних плит на розтяг, а також наявність поперечних і поздовжніх неармованих монолітних стиків. У скінченно-елементній моделі поздовжня жорсткість (EA) плит прийнята еквівалентною 1/100 жорсткості несних вант на розтяг. Такий підхід дозволяє вірно врахувати згинальну жорсткість покриття, а поздовжні зусилля майже повністю передати на несні ванти, таким чином, максимально наблизити розрахункову модель до реальної роботи конструкції.

Несні ванти виконані з пучка дротів діаметром по 5 мм із високоміцної сталі. Для забезпечення форми в поперечному напрямку до несних вант влаштовані

стягуючі троси виконані з канатів. Несні ванти і стягуючі троси змодельовані скінченними елементами типу 304 «стрижень просторової ферми» з урахуванням геометричної нелінійності. Для несних вант модуль пружності прийнято таким, що дорівнює  $2,1 \cdot 10^7$  Т/м<sup>2</sup>, а для стягуючих –  $1,7 \cdot 10^7$  Т/м<sup>2</sup>. Скінченно-елементна модель покриття наведена на рисунках 6, 7.

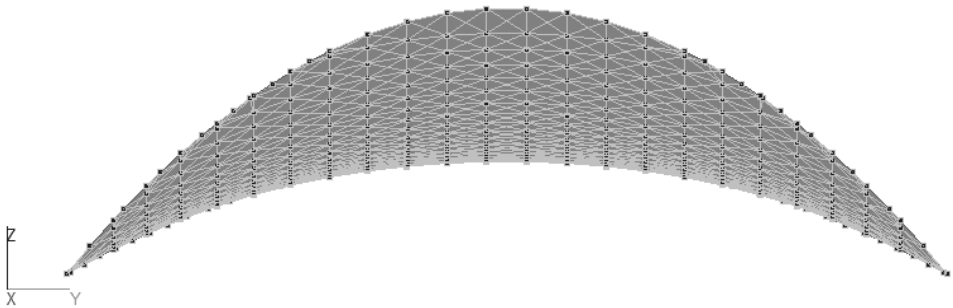


Рис. 6. Скінченно-елементна модель покриття, вид з фасаду

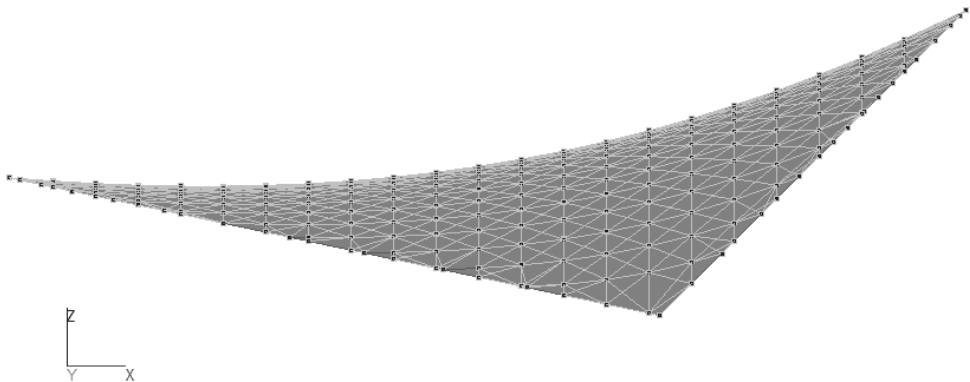


Рис. 7. Скінченно-елементна модель покриття, вид збоку

### **Навантаження на конструкцію**

Навантаження від власної ваги прийнято відповідно до існуючої конструкції покриття з урахуванням шару теплоізоляції і є рівномірно розподіленим. Значення снігового навантаження прийнято відповідно до будівельних норм ДБН В.1.2-2 «Навантаження і впливи. Норми проектування». Оскільки вантові покриття чутливі до нерівномірного навантаження, то крім рівномірно розподіленого навантаження від снігу, по всьому покриттю розглянуто ще 4 варіанти нерівномірного розміщення снігового навантаження. Схеми нерівномірного навантаження наведені на рис. 8.

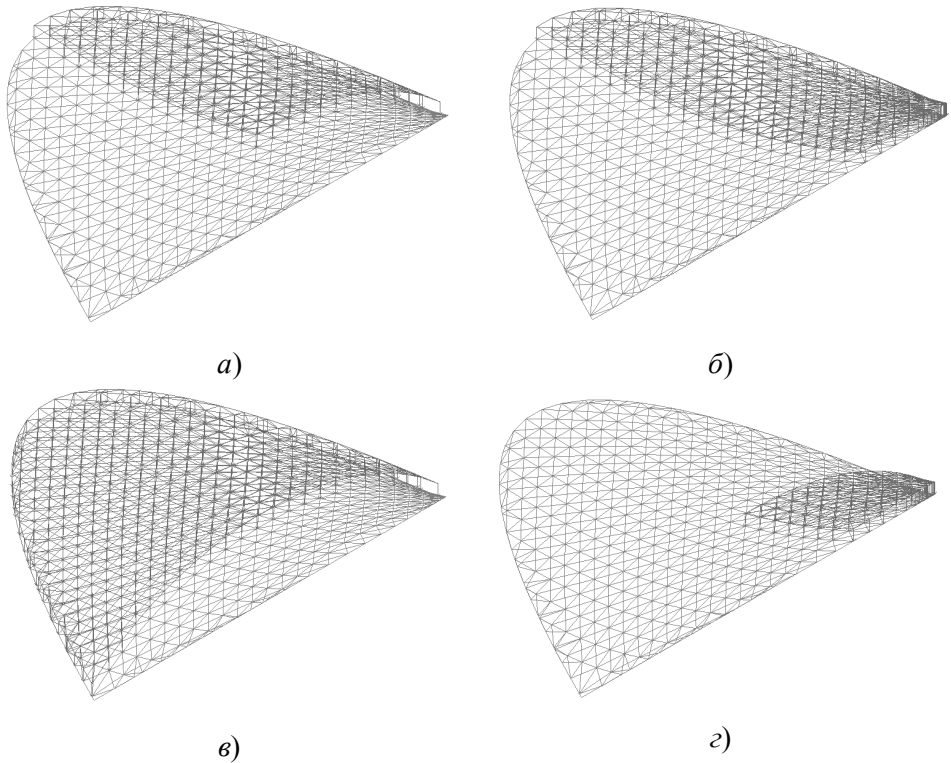


Рис. 8. Снігове навантаження на покриття: а) навантаження на чверть на пологій частині (S1); б) навантаження на половині покриття відносно осі симетрії (S2); в) навантаження на пологій частині покриття (S3); з) навантаження на чверть на крутій частині (S4)

### Динамічні характеристики покриття

Кіноконцертна зала «Україна» знаходиться над підземною лінією метрополітену і сприймає динамічні впливи від руху потягів. Для попередження виникнення резонансних явищ необхідно визначити власні частоти коливань покриття. Періоди і частоти власних коливань покриття визначено для повного постійного навантаження, яке включає власну вагу несних елементів покриття і опоряджувальних шарів.

Розрахунок частот і періодів власних коливань покриття виконано для лінеаризованої системи після геометрично нелінійного розрахунку на спільну дію попереднього натягу вант і власної ваги покриття. Всього розглянуто 21 форму коливань покриття. На рисунках 9–14 показано форми коливань і відповідні їм частоти.

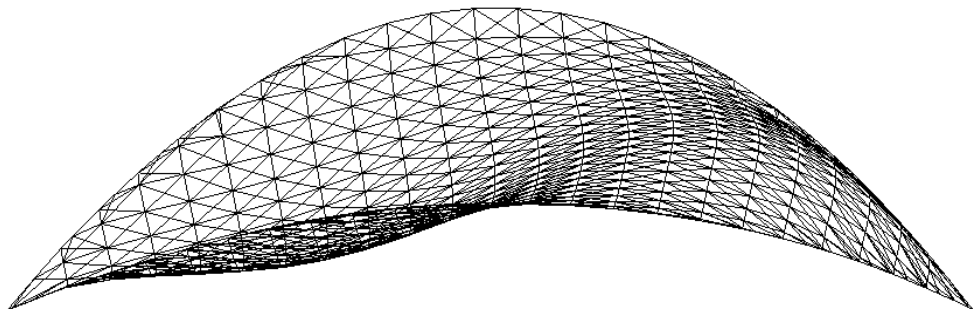


Рис. 9. Форма 1. Частота 0,77 Гц

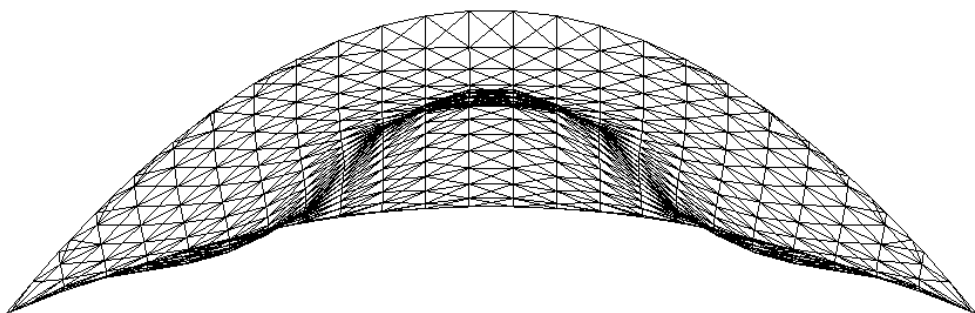


Рис. 10. Форма 2. Частота 1,01 Гц

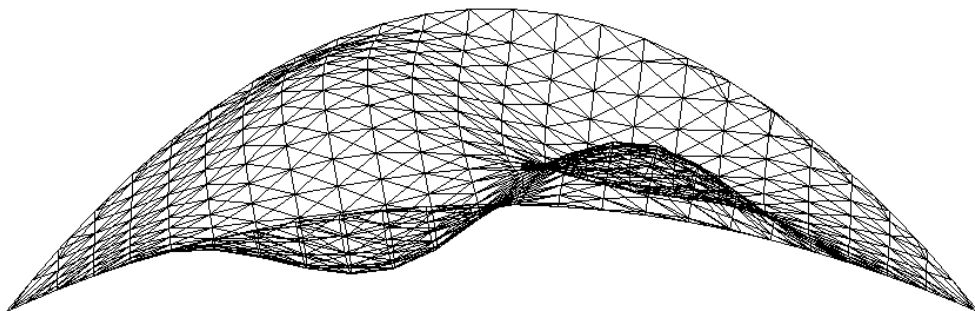


Рис. 11. Форма 3. Частота 1,09 Гц



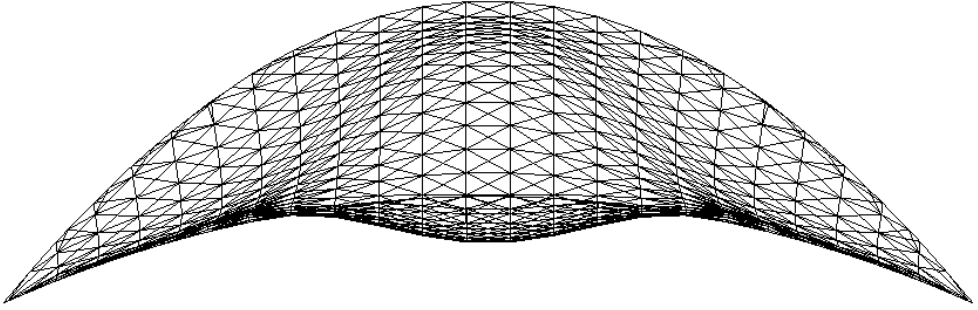


Рис. 12. Форма 4. Частота 1,1 Гц

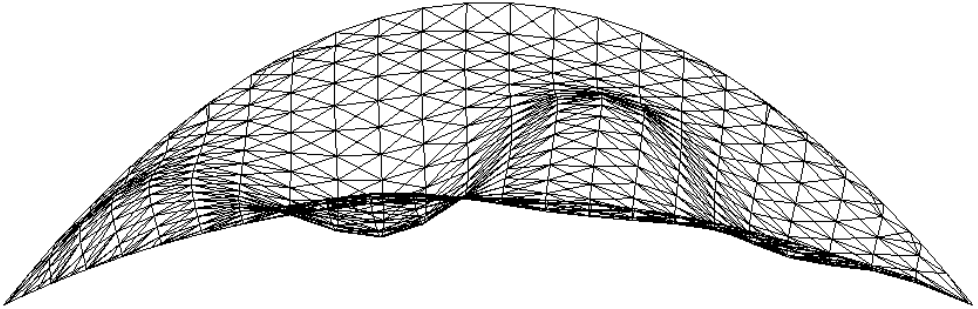


Рис. 13. Форма 5. Частота 1,29 Гц

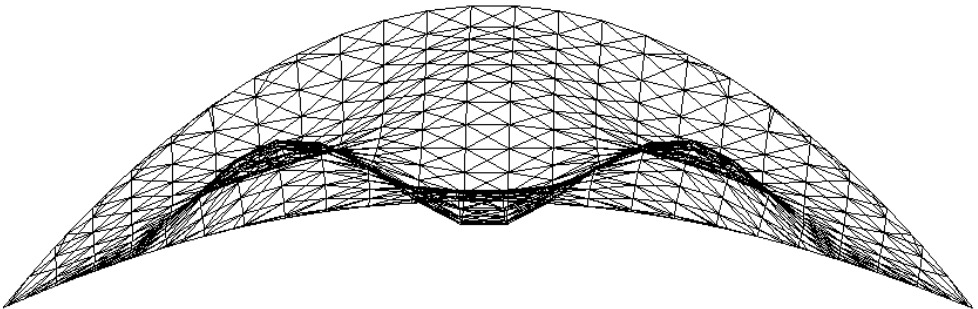


Рис. 14. Форма 5. Частота 1,33 Гц

**Висновки.** Конструкція оболонки покриття кіноконцертної зали «Україна» знаходиться у технічному стані, що відповідає II категорії (задовільний стан). Для підтримання належного технічного стану потрібно виконати заходи, що унеможливають потрапляння води під підшву фундаментів та під килим теплоізоляції покриття.

Моделювання конструкцій і розрахунків покриття у вигляді гіперболічного параболоїда, сформованого ортогональною сіткою сталевих вант і тросів, та укладених на них збірних плит підтверджує нелінійну залежність деформацій від дії навантажень. Принцип незалежності дії та суперпозиції навантажень від попереднього натягу, власної ваги та корисного навантаження для даного типу конструкцій не може бути застосовано.

Отримані за результатами модального аналізу значення частот коливань можуть бути використані для оцінювання вібраційного впливу руху потягів метрополітену.

## **Література**

- [1] Яровой Ю. Н. Обследование висячего покрытия ККЗ «Украина» в г. Харьков / Ю. Н. Яровой, Е. А. Перепелица, Д. В. Чибарев // *Научный вестник строительства*. – Харьков : ХДТУБА, 2016. – № 1 (83). – С. 95–100.
- [2] Гордеев В. Н. Исследования плоских нитяных сетей и тканевых оболочек : дис. ... канд. техн. наук / В. Н. Гордеев // – Киев, 1963. – 217 с.
- [3] Гордеев В. Н. Использование концепции проскальзывания вант для определения начальной формы вантовой сети / В. Н. Гордеев, М. А. Шимановская // *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського*. – Київ : «Сталь», 2013. – Вип. 12. – С. 43–57.

## **Особенности технического и напряженно-деформированного состояния вантового покрытия киноконцертного зала «Украина» в г. Харьков**

**Кордун А. И., Лымарь Я. В.**

Украинский институт стальных конструкций имени В. Н. Шимановского, Украина

**Анотация.** В статье рассмотрены результаты натурного обследования и проблемы моделирования оболочечного покрытия двоякой кривизны киноконцертного зала «Украина» в г. Харьков, ул. Сумская, 35. Покрытие представляет собой вантово-оболочечную конструкцию двоякой кривизны, основными элементами которой являются несущие ванты, закрепленные к массивным наклонным железобетонным аркам. Несущие ванты выполнены из пучка параллельных стальных стержней диаметром 5 мм. Для обеспечения формы двоякой кривизны несущие ванты стянуты формообразующими тросами. На несущие ванты уложены сборные железобетонные тонкостенные плиты

покрытия. Стыки между плитами обетонированы. Поверх плит покрытия уложены теплоизолирующие материалы и цементно-песчаная стяжка. Подвесное покрытие опирается только по контуру арок, промежуточные опоры отсутствуют.

Для определения усилий в несущих вантах в расчетном комплексе SCAD Soft разработана конечно-элементная модель. Координаты узлов конечно-элементной модели определены аналитически, исходя из условий равновесия узлов в вертикальном направлении и скорректированы по результатам геодезических измерений отметок кровли существующей конструкции.

Исследование напряженно-деформированного состояния выполняется в геометрически нелинейной постановке задачи с учетом предварительного напряжения несущих и формообразующих вант.

**Ключевые слова:** конечный элемент, период колебаний, нелинейный расчет.

## **Features of Technical and Stressed-Deformed Condition of the Steel Cable Roofing on the Cinema-and-Concert Hall «Ukraine» in Kharkiv**

**O. Kordun, Ya. Lymar**

V. Shimanovsky Ukrainian Institute of Steel Construction, Ukraine

**Abstract.** The article presents the results of the field survey and the problems of modeling the double curvature shell roofing of the Cinema-and-Concert Hall «Ukraine» in Kharkiv, Sumska str., 35. The roofing is a cable structure of double curvature, the main elements of which are load-bearing cables fixed to massive inclined reinforced concrete arches. Bearing cables are made of an assembly of parallel steel rods with a diameter of 5 mm. To ensure the double curvature shape, the bearing cables are tightened by forming strands. Prefabricated reinforced concrete thin-walled slabs are laid on the supporting cables. The joints between the plates are encased. Thermal insulation materials and cement-sand screed are laid over the covering plates. Suspended roofing is supported only along the contour of the arches, there are no intermediate supports.

To determine the forces in the bearing cables by means of SCAD Soft design complex, a finite element model has been developed. The coordinates of the nodes of the finite element model are determined analytically based on the equilibrium conditions of the nodes in the vertical direction and corrected according to the results of geodetic measurements of the roof marks of the existing structure.

The study of the stress-strain state is performed in a geometrically nonlinear formulation of the problem, taking into account the pre-stressing of the load bearing and shaping cables.

**Key words:** finite element, oscillation period, nonlinear analysis.

*Надійшла до редколегії 27.11.2018 р.*