

РОЗРОБЛЕННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КУПОЛА З УМОВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

В. О. Попов, О. С. Кошівський

У статті розглянуто моделі напружено-деформованого стану металевого каркаса ребристого купола для раціонального проектування, виконана порівняльна оцінка результатів чисельного моделювання методом скінчених елементів та моделювання методами будівельної механіки. Описаний характер роботи досліджуваних конструкцій від дії власної ваги і кліматичних впливів відповідно до конструктивних особливостей. Виявлений ступінь навантаженості елементів каркаса.

В статье рассматриваются модели напряженно-деформированного состояния металлического каркаса ребристого купола для рационального проектирования, выполнена сравнительная оценка результатов численного моделирования методом конечных элементов и методами строительной механики. Описанный характер работы исследуемых конструкций от воздействия собственного веса и климатических воздействий в соответствии с конструктивными особенностями. Выявлена степень загруженности элементов каркаса.

In this article have been examined models of stress-deformed condition of metal frame of ribbed dome for rational design, have been done comparative evaluation of modeling results by super-element's and structural mechanics methods. Have been described the functioning's nature of investigated structures upon dead and climatic loads according to structures particulars. Have been discovered the degree of structures elements.

Вступ

Однією з найбільш економічних та архітектурно виразних конструктивних форм покриття будівель і споруд великих площ є куполи. Конструкції куполів можуть бути ребристими, ребристо-кільцевими й сітчастими. Конструкція ребристого купола складається із трьох основних частин: нижнього опорного кільця, ребер і верхнього кільця. Основними навантаженнями є власна вага конструкції, снігові та вітрові навантаження. Проектування ведеться шляхом розрахунку шарнірної арки, кожна з яких працює самостійно і розглядається незалежно від самого купола. Основною особливістю роботи даної конструкції є сумісна робота меридіальних і кільцевих елементів, що дозволяє забезпечити оптимальне використання міцності матеріалу з поєднанням естетичності і видовищності архітектурних рішень. Найбільш визначними будівлями подібної конструкції є покриття: конференц-залу в штаті Невада (США) діаметром 81,5 м.; виставковий зал в Північній Кароліні (США) діаметром 100 м; виставковий зал в Білграді – діаметр 94 м. Перші відомості про застосування металу в каркасах цивільних будов в Україні належать до 1870 р. Це експериментальне будівництво житлових споруд в Інкермані (Крим), а також реконструкція Андріївського собору в Києві (1892 р.) із заміною пошкоджених дерев'яних несучих конструкцій купола на металеві. Металеві конструкції покриття були застосовані у великих театрах, побудованих у Києві, Львові, Одесі.

Аналіз останніх досліджень

На сьогодні проведено вагомую роботу із вивчення різноманітних аспектів проектування, розрахунку, будівництва і підсилення існуючих конструкцій купольних покриттів різної конструкції і призначення. Основне застосування вони отримали у вирішенні проблем покриття релігійних храмів, торгових комплексів, культурних центрів, банків, об'єктів приватного сектора та ін. Питаннями вивчення роботи купола, стану його роботи при різноманітних впливах і конструктивних особливостях (перерізів елементів, габаритних розмірів, вузлових з'єднань) займалися в Україні в ВАТ «УкрНДІ Проектстальконструкція ім. В. Н. Шимановського» (м. Київ), ДонДАБіА м. Макіївка та його відомі вчені О. В. Шимановський, В. М. Шимановський, в Росії науковці Ульяновського державного технічного університету –В. І. Тур, В. В. Карсункін.

Характеристика об'єкту дослідження

Об'єктом дослідження є металевий ребристий купол десятиповерхового офісного центру діаметром 8,485 м з висотою підйому 6 м, і надбудованим шпилем – 6 м. Даний купол складається з восьми піварок, нижнього опорного кільця і верхнього опорного кільця. Нижнє опорне кільце – залізобетонне, проектується в плані зігнутим по окружності з жорстким з'єднанням в кутах. Кріплення прогонів до ребер вважається шарнірним; кріплення ребер до верхнього поясу шарнірне, до нижнього – шарнірно-нерухоме. Покриття виконане прозорим з використанням подвійних склопакетів.

Постановка проблеми

Таким чином, виникає наукова задача, що полягає у розробленні скінченно-елементної моделі напружено-деформованого стану купола методами скінченних елементів та будівельної механіки, подальший аналіз результатів моделювання, а також задача оцінювання ефективності запропонованих конструктивних рішень за критерієм витрат матеріалів.

Основна частина

Металокаркас купола складається з окремих плоских ребер, розташованих в радіальному напрямку; верхні пояси ребер утворюють поверхню для опирання покриття купола. У вершині купола радіально розташовані ребра примикають до верхнього кільця. Такий металокаркас є розпірною системою, а розпір сприймається опорним кільцем. Раціональною конструкцією кільця є пустотілий циліндроїд з жорстким з'єднанням елементів. Кріплення прогонів до ребер та кріплення ребер до верхнього та до нижнього поясів – шарнірне. При створенні скінченно-елементної моделі використано супер-елемент – просторовий стрижень, який має 6 ступенів вільності.

Збір навантажень на купол:

- 1) власна вага елементів призначається програмою «SCAD» автоматично на основі заданих жорсткостей.
- 2) снігове навантаження визначено згідно з [5, додаток Ж] – для м. Хмельницький – III район, $S_0 = 134 \text{ кг/м}^2$.
- 3) вітрове навантаження на купол призначалося за номером схеми 3 [5, додаток I] – III район.

Значення максимуму снігового навантаження в стрілі купола визначено за формулою (1) та зображено на рис. 2, а:

$$S_m = \gamma_{fm} S_0 C, \quad (1)$$

де S_0 – нормативний тиск снігового покриву; $\gamma_{fm} = 1$ – коефіцієнт надійності за навантаженням. Коефіцієнт C визначено за формулою (2):

$$C = \mu \cdot C_e \cdot C_{alt}, \quad (2)$$

де $C_e = 0,8$ – коефіцієнт, що враховує режим експлуатації покрівлі, $C_{alt} = 1$ – коефіцієнт географічної висоти, μ – коефіцієнт переходу від ваги снігового покриву на поверхні ґрунту до снігового навантаження на покрівлю.

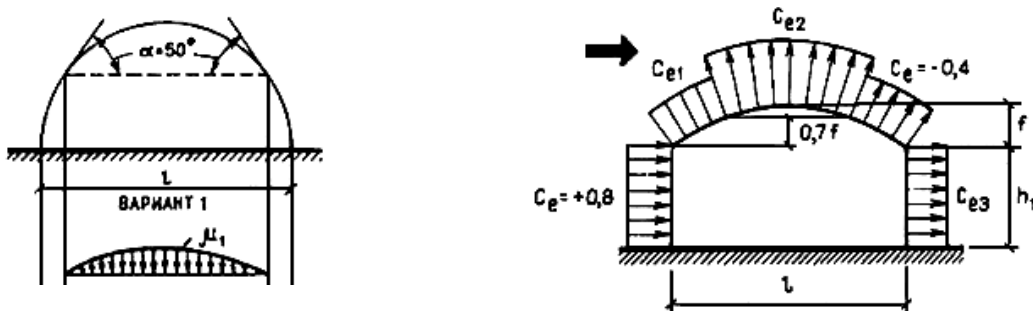


Рис. 1. Схема програми снігового і вітрового навантажень

Середня складова вітрового навантаження (рис. 2, б):

$$W_m = \gamma_{fm} W_0 C \quad (3)$$

де $W_0 = 50 \text{ кг/м}^2$ – нормативне значення вітрового тиску. $\gamma_{fm} = 1$; $C = C_{aer} C_h C_{alt} C_{rel} C_{dir} C_d$, де $C_h, C_{alt}, C_{rel}, C_{dir}, C_d, C_{aer}$ – коефіцієнти визначені за [5, додаток І].

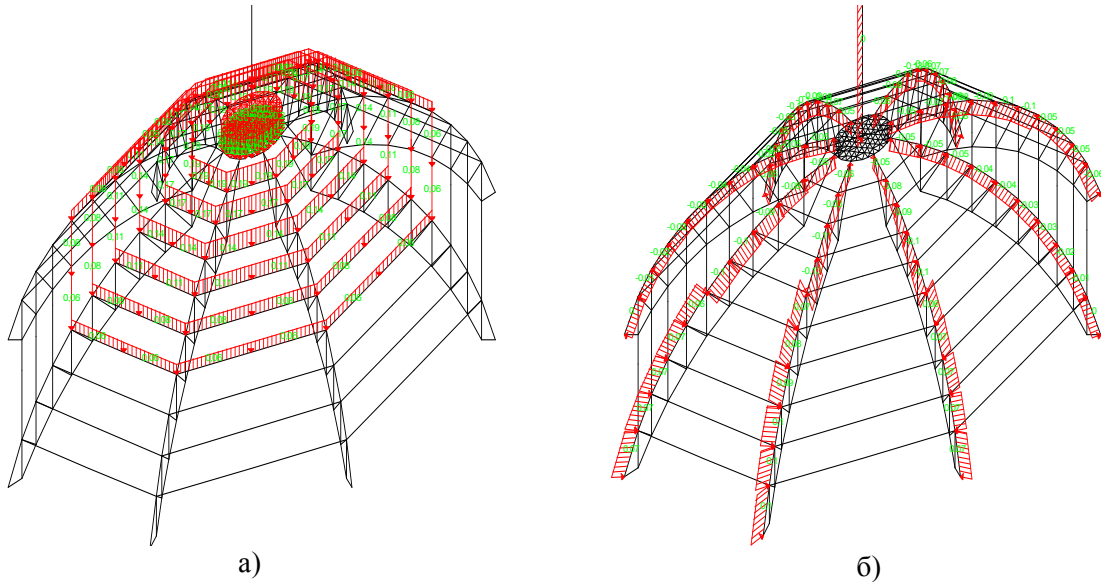


Рис. 2. Модель з кліматичними впливами: а – снігового; б – вітрового навантажень

На рис. 3 зображено модель розподілу навантаження від вітру. За даною моделлю визначено розподіл навантажень на елементи ребер купола. Результати розрахунку представлені у вигляді схем внутрішніх зусиль елементів купола і деформацій елементів від заданого навантаження (рис. 1-4). Підбір перерізів елементів проводився автоматизовано, засобами «SCAD» відповідно до вимог чинних норм [6-8].

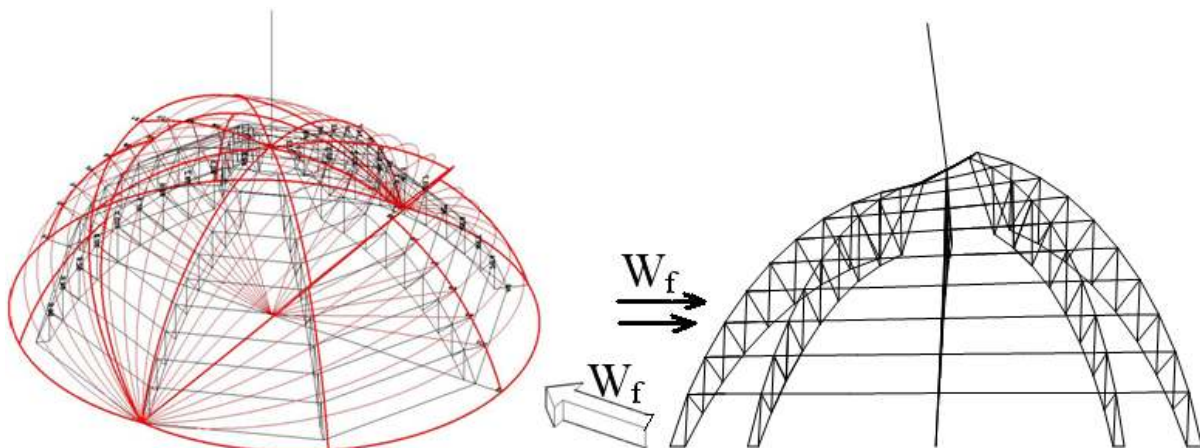


Рис. 3. Модель розподілу навантаження від вітру та деформації купола від цього впливу.
 W_f – напрямок вітрового потоку

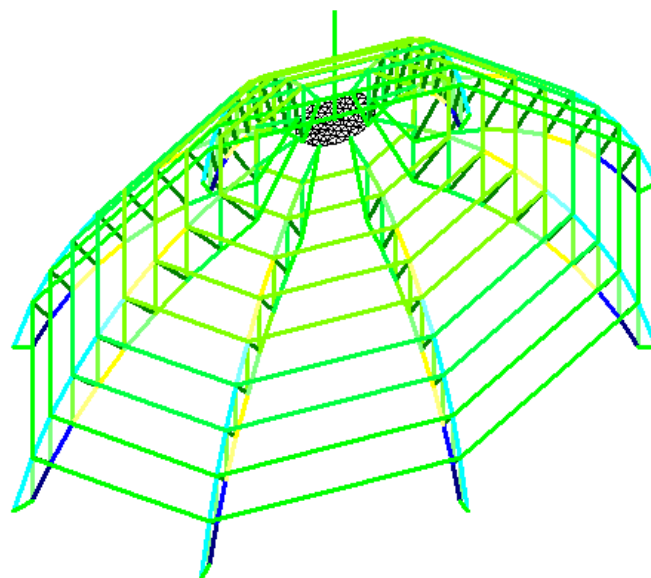


Рис. 4. Поздовжні зусилля стрижнів

При моделюванні роботи конструкції купола методами будівельної механіки розглядалися системи зв'язаних між собою тришарнірних арок. Розрахункова схема подана на рис.5. Визначено опорні реакції. Після чого геометричним методом Максвелла визначено внутрішні зусилля в стрижнях, за якими виконано раціональне проектування металокаркаса купола.

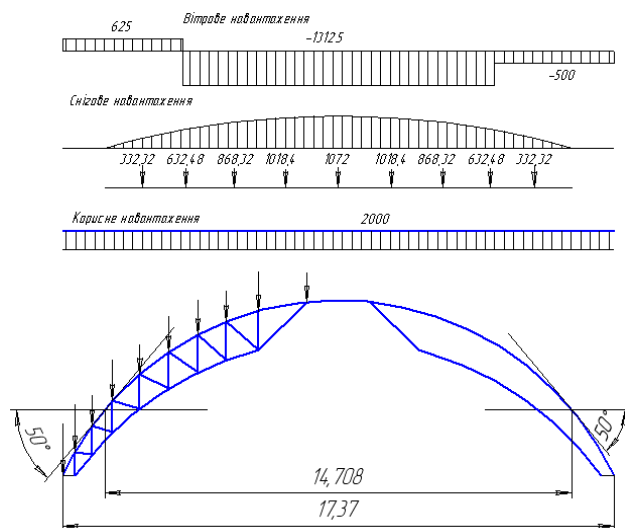


Рис. 5. Модель тришарнірної арки – елемента каркаса купола

Визначення перерізів в стрижневих елементах для різних випадків напруженого стану по першій і другій групі граничних станів провадиться відповідно до зусиль, розрахованих поєднанням навантажень і зусиль, отриманих після статичного розрахунку конструкції.

Виконано аналіз підбору оптимальних перерізів з умов забезпечення максимально якісних економічно-конструктивних характеристик розглянутих профілів (кутиків рівнобоких і нерівнобоких, прямокутних, круглих і квадратних труб). Проведено аналіз ефективності

запропонованих конструктивних рішень з точки зору витрат матеріалу та собівартості в умовах безвідходного виробництва.

Після аналізу зусиль у стержнях і зіставлення з несучою здатністю проведено коригування перерізів елементів металокопункцій купола. В результаті моделювання методом скінченних елементів засобами програмного комплексу “SCAD” підібрано перерізи елементів, виходячи з критеріїв технологічності та мінімальної металоемності:

- верхній пояс ребер – труба 100×100×3;
- нижній пояс ребер – труба 80×80×3;
- розкоси – труба 80×80×3;

Методами будівельної механіки відповідно до [4] підібрано:

- верхній пояс ребер – труба 80×80×3;
- нижній пояс ребер – труба 70×70×3;
- розкоси – труба 63×63×3.

Висновки

Таким чином, розробленні скінченно-елементні моделі напружено-деформованого стану каркаса купола різними методами з врахуванням нелінійного впливу вітру, дозволили розробити методику раціонального проектування каркаса.

- Створено модель напружено-деформованого стану купола оптимальної форми, з врахуванням особливостей кліматичних впливів і геометричних параметрів даного об’єкта.
- Проведено ґрунтовний аналіз результатів моделювання та підбір раціональних перерізів з умов забезпечення максимально якісних економічно-конструктивних характеристик ефективності запропонованих конструктивних рішень з точки зору витрат матеріалу та собівартості в умовах безвідходного виробництва.
- Достовірність результатів підтверджується малим розбігом значень внутрішніх зусиль за двома методами розрахунку.

Використана література

1. Беленя Е. И. Купольные покрытия. – В кн.: Металлические конструкции. Учеб. для вузов / Беленя Е. И. Гениев А. Н., Балдин В. А. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 463-469.
2. Савельев В. А. Теоретические основы проектирования металлических куполов: Дис... докт. техн. наук. – Москва, 1995. – 439 с.
3. Голосов В. Н. Купола ребристые, сетчатые и панельные / Голосов В. Н., Ермолов В. В., Лебедева Н. В. и др. – В кн.: Инженерные конструкции. Учеб. для вузов по спец. “Архитектура” / Под ред. В. В. Ермолова. – М.: Высш. шк., 1991. – С. 233-235.
4. Квадратні труби. Сортамент. ГОСТ 12336-66. – М., 1985. – 28 с.
5. Навантаження і впливи. Норми проектування. ДБН В.1.2-:2006. [На заміну СНиП 2.01.07-85 (крім розділу 10)]. [Чинний від 2007-01-01] – К.: Мінбуд України, 2006. – 71 с. – (Державні будівельні норми України).
6. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. [На заміну розділу 10 СНиП 2.01.07-85]. [Чинний від 1 січня 2007 р.] – К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с.
7. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. ДБН В.2.6-163:2010. [На заміну СНиП II-23-81*окрім розділів 15*-19, СНиП III-18-75 окрім розділів 3-8, СНиП 3.03.01-87 у частині, що стосується сталевих конструкцій окрім п.п. 4.78 - 4.134.]. [Введ. з 1 грудня 2011 р.] – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 219 с.
8. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. ДБН В.1.2-14-2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с.

Попов Володимир Олексійович – к.т.н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету.

Кошівський Олексій Сергійович – студент Вінницького національного технічного університету.