

СТІЙКІСТЬ ТОНКОСТІННИХ КУПОЛЬНИХ СИСТЕМ ПРОТИ ВІТРОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У науковій роботі розглянуто важливу проблему, яка виникає при проектуванні та експлуатації купольних систем – вплив вітрових навантажень на стійкість конструкції. Зосереджуючись на підвищенні опору купола вітровому тиску, дослідження включає в себе вивчення геометричних та структурних параметрів, які можуть ефективно зменшити вплив вітру на конструкцію. Враховуючи динамічний характер вітрових сил та використовуючи сучасні інженерні технології, дослідження спрямоване на розробку нових рішень для забезпечення максимальної стійкості купольних систем у вітряних умовах шляхом оптимізації форми купола, використання матеріалів з високим опором вітру, а також вдосконалення конструктивних рішень для зменшення горизонтальних напружень. Результати цього дослідження можуть використовуватися в архітектурному та інженерному проектуванні для поліпшення безпеки та довговічності купольних споруд у регіонах з високим рівнем вітрових навантажень.

Ключові слова: купол, купольна система, вітрові навантаження, стійкість, напруження, конструкція, опукле покриття, каркас.

Abstract

The scientific work considers an important problem in the design and operation of dome systems - the influence of wind loads on the stability of the structure. Focusing on increasing the dome's resistance to wind pressure, the study includes the study of geometric and structural parameters that can effectively reduce the impact of wind on the structure. Taking into account the dynamic nature of wind forces and using modern engineering technologies, the research is aimed at developing new solutions to ensure maximum stability of dome systems in windy conditions by optimizing the shape of the dome, using materials with high wind resistance, as well as improving structural solutions to reduce horizontal stresses. Results of this research can be used in architectural and engineering design to improve the safety and durability of dome structures in regions with high levels of wind loads.

Key words: dome, dome system, wind loads, stability, stress, construction, convex covering, frame.

Вступ

Історія куполобудування почалася ще в доісторичні часи, однак, розповсюдження купольних систем по різних країнах давнього світу не однакове. Наприклад, в Стародавній Греції, використання куполів було вкрай обмежене через складність зведення. Технологічно складні та великі куполи отримали широке розповсюдження під час римської архітектурної революції, для улаштування покриттів храмів і великих громадських споруд. Вважається, що найдавніший купол з нині існуючих розташований в римському Пантеоні, зведеному приблизно в 128 році нашої ери. Традицію куполобудування перейняла візантійська християнська культова архітектура. Кульмінацією цього періоду стало застосування революційної вітрильної технології при зведенні Софійського собору у Константинополі. Широко відомі, також, купольні системи пам'яток архітектури Епохи Відродження, куполи середньовічного Китаю та Індії [1].

Купол – просторова несуча конструкція у вигляді опуклого покриття круглої, еліптичної, квадратної або багатокутної в плані споруди. У ХХ ст. з'явилися куполи ребристі, ребристо-кільцеві, з хвилястою внутрішньою поверхнею, а також геодезичні куполи Б. Фуллера (рис.1), монолітні збірні

П.Л. Нерві, куполи з нестандартних матеріалів, наприклад, з монолітного полікарбонату (рис. 2) чи закаленого скла тощо.



Рис. 1. Геодезичний стрижневий купол Фуллера.



Рис. 2. Безкаркасні куполи з монолітного полікарбонату.

На сьогодні купольні системи є ефективними, архітектурно виразними, але конструктивно складними компонентами будівель і споруд, які сприймають кліматичні та технологічні навантаження.

Область сучасного застосування купольних систем, доволі, широка. Куполи застосовуються для покриття культових споруд, яким надають особливий архітектурний стиль та символіку; для покриття великих глядацьких залів та амфітеатрів, музеїв, виставкових центрів, планетаріїв, де куполи забезпечують ефективне використання простору без додаткових опор; для перекриття об'єктів обслуговування – торгових центрів, ресторанів, вокзалів, аеропортів для створення вражаючих вільних просторів; як покриття унікальних спортивних об'єктів; для формування споруд теплиць та сільського господарства.

Будова стандартної каркасної купольної системи включає такі основні елементи:

- Каркас – структурна рама, що утримує криволінійну форму купола та передає навантаження на нижче розташовані конструктивні елементи (стіни або фундаменти споруди).
- Опорне кільце – горизонтальний елемент в основі купола, що допомагає сприйняти розпів купольної системи, а також служить для передачі ваги купола на опорну конструкцію або фундамент.
- Купольні ребра – криволінійні вертикальні або нахилених елементи, які утворюють просторову структуру купола.
- Покриття купола – огорожувальні конструкції, що покривають зовнішню поверхню купола (залізобетонне, дерев'яне, скляне, полікарбонатне, металеве, тентове).
- Верхній вінчальний камінь (ліхтар): Верхній елемент, який може мати відкритий або закритий дизайн і дозволяє світлу та повітрю проникати всередину [2].

Через значні прольоти, що перекриваються куполами та відносно невелику товщину купольних оболонок, інженери приділяють особливу увагу взаємодії з вітровими потоками.

Пів сферична або еліптична форма куполів, незалежно від розмірів, конструктивних матеріалів каркасу та покриття є дуже вдалою з точки зору аеродинаміки, оскільки плавні обводи куполів добре огинаються вітровими потоками, навіть при впливі штормового чи ураганного вітру. Однак, чим менша вага і жорсткість покриття куполів, тим ймовірнішою є поява граничного стану – втрати стійкості купольної форми. Особливо це стосується безкаркасних конструкцій [3, 4] та каркасних систем з тентовим покриттям [5]. Тому подальші дослідження, які стосуються удосконаленню тонкостінних купольних систем для опору вітровим навантаженням є доцільними і актуальними.

Основна частина

Під час експлуатації, купольні системи піддаються різноманітним навантаженням, серед яких можна виділити: статичні (вага конструкції купола та обладнання), динамічні (вітрові), тимчасові (снігові, ожеледні навантаження), термічні (розширення та стиск матеріалів), конструкційні (сили, що виникають внаслідок внутрішніх напружень та деформацій через недосконалість форми та просідання основ.

Вітрові навантаження можуть спричиняти більшу шкоду купольним конструкціям порівняно з сніговими та ожеледними впливами. Це пояснюється тим, що по-перше: вітер створює суттєві горизонтальні сили, які діють на поверхню купола та можуть викликати значні горизонтальні напруження та деформації куполів, що вимагає надійного супротиву з боку їх несучих елементів. По-друге: швидкість вітру зазвичай зростає з висотою над землею, і чим вища конструкція, тим більше вона відчуває вплив вітру. Крім того, куполи, як компоненти покриття, можуть бути експонованими, що означає відсутність природних перешкод для захисту від сильних вітрів. З іншого боку, снігові та ожеледні навантаження, хоча і можуть бути значними, зазвичай здійснюють вертикальний, часто полярно симетричний вплив на купол, що набагато менш небезпечно для купольної конструкції, ніж горизонтальні вітрові впливи.

Методологія збору вітрових навантажень на конструкцію купола детально описана у [6] та [7]. Граничне розрахункове вітрове навантаження згідно з [7]:

$$W_m = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C \text{ [кН/м}^2\text{]}, \quad (1)$$

де W_0 – нормативний вітровий тиск; γ_{fm} – коефіцієнт надійності за граничним значенням вітрового навантаження; C – коефіцієнт, що визначається за формулою (2):

$$C = C_{aer} \cdot C_h \cdot C_{alt} \cdot C_{rel} \cdot C_{dir} \cdot C_d, \quad (2)$$

У формулі (2) C_h – коефіцієнт висоти споруди; C_{alt} – коефіцієнт географічної висоти, C_{dir} – коефіцієнт напрямку; C_{rel} – коефіцієнт рельєфу; C_d – коефіцієнт динамічності. Для знаходження аеродинамічного коефіцієнта C_{aer} сферичного купола слід визначити число Рейнольдса: $Re = 0,88 \cdot d \cdot \sqrt{W_0 \cdot C_h \cdot \gamma_{fm}}$ [7].

Схема розподілу аеродинамічних коефіцієнтів у плані та по висоті купальної споруди діаметром основи 13,5 м, які за характером тотожні розподілу вітрових тисків, показана на рис. 3 та рис. 4.

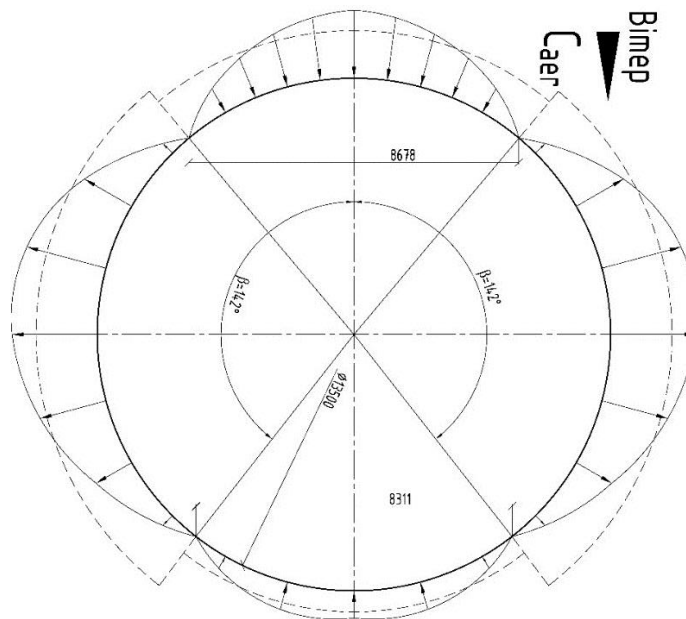


Рис. 3. Схема, що ілюструє розподіл аеродинамічних коефіцієнтів у плані.

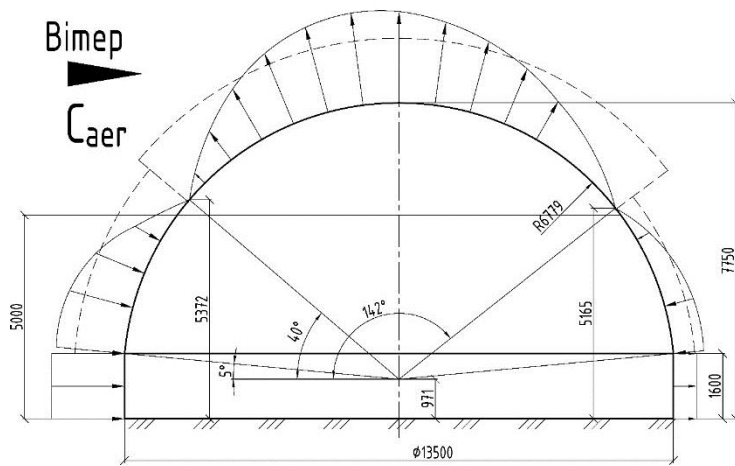


Рис. 4. Розподіл коефіцієнтів аеродинамічності та вітрового тиску на купол по висоті.

Зі схем, зображених на рис. 3 і 4 випливає, що при вітровому впливі куполи змінюють свою форму (викривляються у плані та по висоті). Тому для тонкостінних конструкцій виникає небезпека втрати стійкості.

Для поліпшення жорсткості і забезпечення стійкості тонкостінних купольних систем проти негативного впливу вітрових навантажень пропонується застосувати комплексний інженерно-технічний підхід, який полягає у застосуванні різних заходів, спрямованих на підвищення живучості споруди, а саме:

1. Надійне кріплення опорного кільця до основ або вертикальних несучих елементів (введення внутрішніх опорних елементів чи каркасу, які підсилюють структуру і підтримують стабільність під час вітрових навантажень).
2. Улаштування внутрішніх ребер жорсткості для забезпечення стійкості форми споруди.
3. Улаштування вітрозахисних щитів (модифікація зовнішньої поверхні купола для зменшення турбулентності).
4. Улаштування протижезедних покриттів, які зменшать вітровий опір споруди.
5. Використання сучасних гладких композитних матеріалів покриття, які поєднують міцність із низькою вагою (наприклад, монолітний полікарбонат).
6. Застосування натяжних систем для тентового покриття.
7. Встановлення систем моніторингу для постійного відстеження стану конструкції та реагування на будь-які ознаки стресу чи пошкоджень.
8. Використання комп'ютерних програм для детального аналізу вітрових навантажень та визначення слабких точок конструкції.

Висновки

При виконанні цієї науково-дослідної роботи розглянуто основні методи підвищення стійкості тонкостінних купольних систем для протидії вітровим навантаженням. Окреслено раціональні конструктивні рішення куполів, їх класифікація та види навантажень, що на них впливають. Доведено, що кліматичний вплив, особливо вітрова компонента, негативно впливають та стійкість, міцність, жорсткість на довговічність купольної системи. Окреслено конкретні конструктивні заходи, щодо збільшення стійкості купольних конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Архітектурні конструкції: Навч. посібник (для студентів спеціальності «Містобудування» напряму 1201 – «Архітектура»). Автор: Дрьомова Л.В. –Харків: ХНАМГ, 2007 – (164)171 с.
2. Купол // Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури / Р. А. Шмиг, В. М. Боярчук, І. М. Добрянський, В. М. Барабаш ; за заг. ред. Р. А. Шмига. — Львів, 2010. — С. 114. — ISBN 978-966-7407-83-4.

3. Попов В.О. Моделювання напружено-деформованого стану тонкостінних куполів з полікарбонату для раціонального проектування. / В.О. Попов, А.В. Попова, Вей Ван // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2022-2. С. 81 – 93.
4. Попов В.О. Безкаркасні тонкостінні куполи з монолітного полікарбонату – система покриття майбутнього [Електронний ресурс] / В.О. Попов, Вей Ван // Тези доповіді на Міжнародній науково-технічній конференції: «Інноваційні технології в будівництві-2022» (м. Вінниця, 23-25.11.2022) – Електрон. текст. дані. – 2022. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2022/paper/view/16738>
5. Попов В. О. Раціональні геодезичні стрижневі купольні системи для пересувних планетаріїв [Електронний ресурс] / В. О. Попов, О. С. Баранецька // Матеріали ІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ : Збірник доповідей, Вінниця, 14-23 березня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. С. 1480 – 1484. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/18983>
6. Попов В.О. Розроблення скінчено-елементної моделі напружено-деформованого стану куполу з умов оптимального проектування. / В.О. Попов, О.С. Кошівський // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2012-1. С. 11 – 15.
7. ДБН В.1.2.-:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [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).

Попов Володимир Олександрович — к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, email: v.a.popov.vntu@gmail.com. ORCID 0000-0003-2379-7764

Баранецька Олена Сергіївна – бакалавр будівництва, фахівець центру забезпечення якості освіти Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця. email: alexeyielenka@gmail.com

Мицик Тетяна Сергіївна – студентка факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна, email: mtsuaau@gmail.com.

Popov Volodymyr O. — Ph.D. Docent of department of civil engineering, architecture and municipal economy, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia city, Ukraine, email: v.a.popov.vntu@gmail.com. ORCID 0000-0003-2379-7764

Baranetska Olena S. – bachelor of civil engineering, specialist of the center for ensuring the quality of education of the Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa city, email: alexeyielenka@gmail.com

Mysik Tetyana Serhiivna– student of Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia city, Ukraine, email: mtsuaau@gmail.com.