

УДК 624.014:69.074

Кієнко Є.Є., Лавріненко Л.І., к.т.н., доцент
Київський національний університет будівництва і архітектури

АНАЛІЗ СЦЕНАРІЮ ПРОГРЕСУЮЧОГО РУЙНУВАННЯ СТЕРЖНЬОВОГО КУПОЛА

Виконано аналіз стержньового ребристого купола, побудована його стержньова модель та визначені елементи, властивості яких призводять до найбільш несприятливої ситуації одиначної живучості. Розглянуто сценарій прогресуючого руйнування. Наводяться результати проектування відповідно до норм Єврокод та альтернативні варіанти підвищення живучості споруди.

Ключові слова: стержньовий купол, опорний контур, прогресуюче руйнування, живучість..

Діяльність людського суспільства наприкінці ХХ - початку ХХІ століття пов'язана з розвитком великих технічних і організаційно-технічних систем глобального масштабу, які забезпечують життєдіяльність у політичній, економічній, військовій, екологічній та інших областях. Зазвичай ці системи мають розвинені комунікації енергоносіїв, зв'язку, управління, транспорту, насичені засобами автоматики, мають складну структуру ресурсозабезпечення та взаємодії. У міру розвитку подібних систем зростає їх чутливість до різного роду зовнішніх ушкоджуючи / аварійних впливів стихійного (землетруси, повені, сонячна активність, погодні катаклізми) і цілеспрямованого характеру (бойові дії, тероризм).

При аналізі стану питання в різних сферах, в яких проблема живучості є першорядною та стоїть гостро (військова сфера, радіоелектроніка та ін.), стає помітно, що тут існує велика кількість специфічних напрацювань, добре сформованих і відпрацьованих підходів. Проблема живучості для них є рядовою. Спільним для всіх сфер є аналіз поведінки систем при виході з ладу складових її частин. Виявлення при цьому додаткових резервів систем, альтернативних шляхів перерозподілу зовнішніх впливів при їх за критичному рівні виливається у вивчення властивості живучості.

Однак, підходи з інших сфер не завжди підходять для проектування будівельних конструкцій через відмінності в типах систем (організації, внутрішньої топології, умов функціонування). З системних позицій фундаментальних наук проблема живучості розглядається в рамках узагальненої проблеми стійкості - математичної теорії катастроф, основні положення якої були сформульовані ще на початку ХХ століття.

В цілому аналіз публікацій і проектних матеріалів показує, що на сьогоднішній день ще не досягнуто системне, достатньо узгоджене тлумачення сукупності властивостей об'єктів техніки, що характеризують їх експлуатаційну працездатність (надійність, живучість, ефективність і безпека). Такий стан питання пояснюється тим, що теорія живучості систем знаходиться на стадії становлення та оформлення в самостійну наукову дисципліну.

Ключовий момент, невід'ємний для всіх галузей, – це безпека людської життєдіяльності. У більшості сфер рішення проблеми безпеки будь-якої системи виливається в забезпечення двох її головних властивостей: надійності та живучості, а саме, надійність розглядається як здатність непошкодженої конструкції виконувати своє функціональне призначення, а живучість – як здатність пошкодженої системи виконувати своє функціональне призначення [4]. При цьому друга властивість до певного часу закладалася в проєктовані системи найчастіше на підсвідомому рівні.

Новітні норми проєктування [1,2] закладають вимогу проєктування з врахуванням живучості на альтернативному рівні та регламентують живучість (англ. *robustness*) як здатність пошкодженої системи адаптуватися до нових і, як правило, непередбачених ситуацій, протистояти шкідливим діям, виконуючи при цьому свою цільову функцію, за рахунок відповідної зміни структури і поведінки системи.

Окрема із загального стану є ситуація, що склалася в будівельних науках. Останнім часом в будівництві набирає обертів «архітектурний» бум, що полягає у тиску архітектурних показників (естетики екстер'єрів та інтер'єрів) над конструкторською практикою. У підсумку ускладнення будівель і споруд, що виражається у зростанні довжин прольотів, величин висотних відміток, нерідко використанні збитої сітки колон, нових матеріалів. В сукупності з ринковою конкуренцією («гонкою» за скорочення термінів, зниження собівартості будівництва) це призводить до зведення маловивчених і недостатньо апробованих, а, значить, і ризикованих конструктивних форм. Саме такі споруди, зважаючи на реалії, потребують розрахунку на живучість. Для цього сучасні вчені досліджують механіку катастроф та прогресуюче руйнування конструкцій.

Метою даної роботи є аналіз конструкції стержньового ребристо-кільцевого купола та побудова найбільш небезпечного сценарію його руйнування (одинична живучість).

Задачею дослідження є пошук елементів, що можуть призвести до прогресуючого руйнування, тобто процесу глобального руйнування споруди внаслідок локального пошкодження одного елемента, а також рекомендації щодо проєктування.

Методи дослідження – побудова та розрахунок стержньової моделі МКЕ ребристо-кільцевого купола в ПК ЛІРА.

Відомо, що сталеві конструкції сучасних великих куполів прольотом до 125 м виконуються переважно як одношарові сітчасті або ж як просторові структурні оболонки [5]. Однією з таких споруд є сучасний центр водного фрістайлу у м. Мінську, Республіка Беларусь (рис.1). Серед можливих просторових схем куполів: ребристої, ребристо-кільцевої, сітчастої, – обрана наскрізна ребристо-кільцева схема, в якості кілець якої виступають тригранні просторові ферми.



Рис.1. Архітектурне рішення центру водного фрістайлу: купольне покриття та гірка зі спортивними трамплінами

Споруда являє собою купол діаметром 90 м і висотою 27 м. До нього примикає трикутна 40-метрова висотна "призма", геометрична форма якої обумовлена розміщенням в ній трамплінів для водного фрістайлу. Купол переважно регулярний (регулярність куполу порушена в зоні примикання гірки для трамплінів) та має ребристо - кільцеву конструктивну форму. Ребрами служать радіальні ферми, кільцями – тригранні кільцеві ферми. Сталеві напіварки на висоті 23,9 м спираються на розпірне кільце діаметром 16 м, а в нижній, на позначці +4,2 м на суцільне розпірне кільце. Ферми виготовляються із прокатних труб. Радіуси кривизни верхнього та нижнього поясів складають відповідно 60 м та 58 м. Купол складається з 22 плоских ферм, що розміщуються радіально з кроком 15° . Конструкція купола спирається нижнім розпірним кільцем на колони, що мають висоту 5,1 м. Колони з обох кінців закріплено шарнірно [7].

Таким чином, не полишаючи технологічних переваг ребристої схеми, схема отримала додаткові якості просторової стержньової структури, яка дає можливість забезпечити високу надійність конструкцій в складних екстремальних ситуаціях [6].

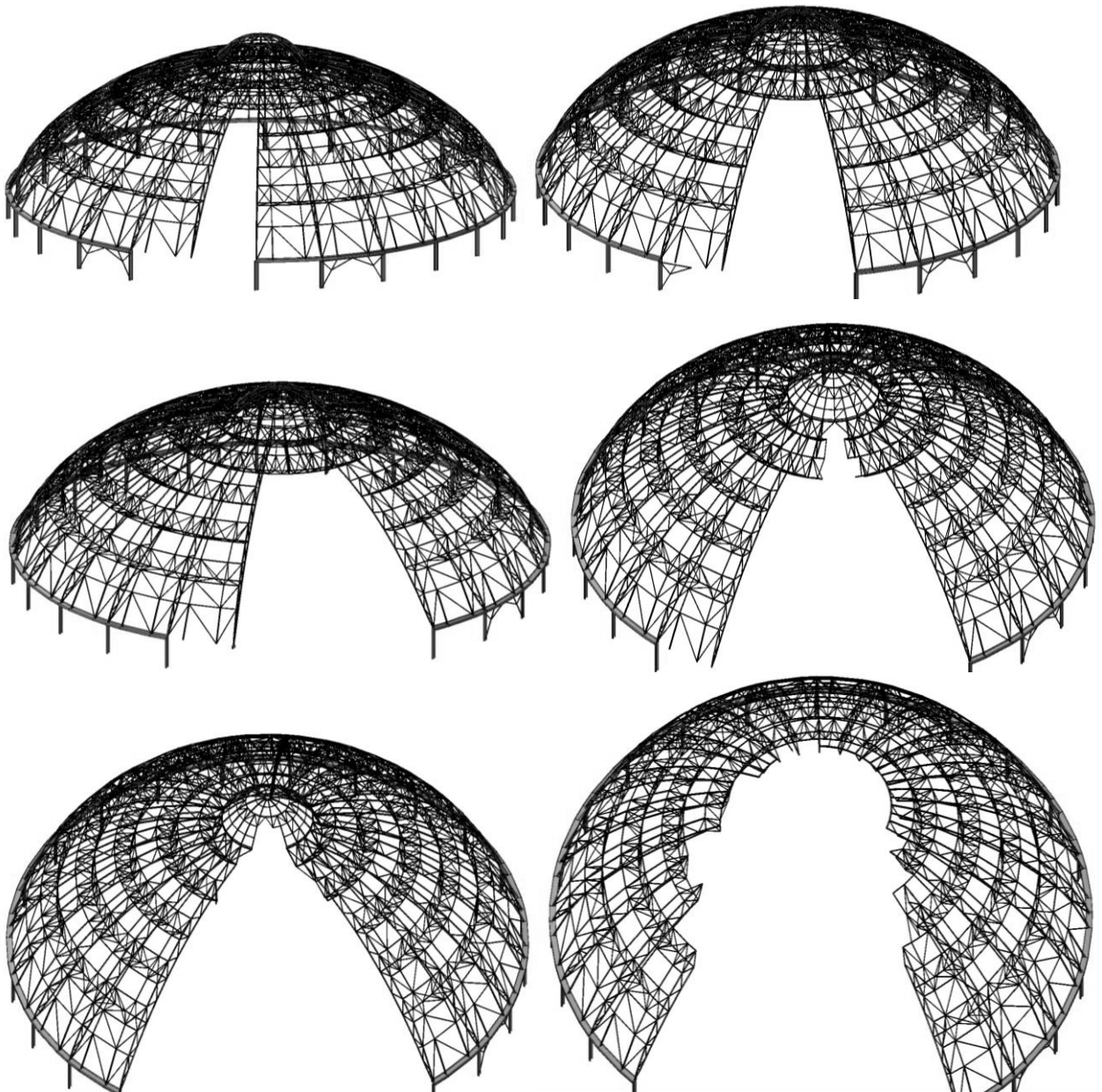


Рис.2. Сценарій прогресуючого руйнування сталевго ребристо-кільцевого купола з опорним контуром, що спирається на колони (елементи з порушенням вимог першого граничного стану послідовно вилучаються)

Останнім часом катастрофи при руйнування покриттів спричинили висування ряду вимог щодо роботи великопролітних споруд на стадії експлуатації. Купольне покриття з надмірною, з точки зору оптимального проектування, кількістю в'язей має значно більший ресурс живучості, що в європейських нормах враховується як *progressive collapse prevention*, тобто можливість при руйнуванні деякої частини елементів перерозподіляти навантаження між іншими елементами.

Особливе місце в механіці катастроф займає вивчення процесу закритично поведінки елементів конструкцій(систем), коли у своїй за критичній області

вони виходять з ладу і впливають на інші елементи системи, породжуючи внутрішні для самої конструкції негативні впливи. Зовнішні та внутрішні впливи призводять до послідовності відмов елементів системи, що ініціюють її перехід в аварійний стан (рис.2).

Споруда була розрахована за сценарієм прогресуючого руйнування і були представлені варіанти збільшення її живучості. За критерій живучості була прийнята наступна умова – живучість конструкції забезпечена, якщо первинні відмови елементів не призводять до руйнування інших елементів, на які перерозподіляється навантаження.

Розрахункова схема була побудована в розрахунковому комплексі ЛПРА-САПР. Собою вона представляла модель із стержневих скінченних елементів, якими моделювалися ферми, пояси, колони, а також чотирикутних скінченних елементів, що моделювали металевий профільований настил. Схема була навантажена постійним навантаженням – власна вага конструкцій, змінним – сніг, вітер у двох напрямках, технологічним – навантаження від ходових містків та обладнання.

Розрахунок виконувався відповідно до норм Єврокод [3] Аварійна ситуація моделювалася за найбільш несприятливим сценарієм одиначної живучості – виключення з роботи найбільш завантаженої колони. Така колона розташовується біля отвору для гірки. Окрім постійного навантаження (вага конструкцій купола) в розрахунку було враховано одне супроводжуваче навантаження від снігу.

Після виключення з роботи колони розглядається нова розрахункова схема. Розрахунок нової (аварійної) розрахункової схеми показав, що згинальний момент M_z (від розпору), який діє в площині XOY збільшився майже в чотири рази, а момент M_y (балковий), діючий в площині XOZ – збільшився майже в півтора рази. Крім того збільшується стискувальне зусилля в сусідніх колонах.

При перевірці за прогресуючим обваленням параметри матеріалів приймаються за характеристичними значеннями. Величина деформацій у конструкціях у даному випадку не регламентується [1].

Через те, що переріз нижнього розпірного кільця не проходить перевірку за першим граничним станом на новий розрахунковий момент, виключаємо з роботи ту ділянку нижнього розпірного кільця, що не пройшла перевірку. Після розрахунку нової (аварійної) розрахункової схеми бачимо, що стискувальне зусилля в сусідній колоні збільшилося майже в два рази. Колона не проходить перевірки на стійкість, тому маємо виключати її з розрахункової схеми.

Такий результат показує, що виключення з роботи найбільш завантаженої колони призводить до прогресуючого руйнування несучих конструкцій та вимагає збільшення живучості споруди.

Відповідь на питання – як збільшити живучість конструкції – можна отримати шляхом аналізу механізму прогресуючого руйнування, сценарій якого має такий вигляд: якщо виключається з роботи колона, то і виключається з роботи ділянка розпірного кільця під колоною. Це в свою чергу призводить до перерозподілу навантаження і в результаті збільшується зусилля в сусідній колоні. Така колона не витримує навантаження і теж виключається з роботи і так далі... З цього стає очевидно, що ключовими елементами конструкції є нижнє розпірне кільце і колони. Конструкція «падає» при відмові колони. При відмові інших елементів відбувається локальне руйнування в межах радіального сектору.

Норми проектування [1] пропонують такі варіанти збільшення живучості конструкцій:

1. Закладання більшої надійності;
2. Дублювання систем, багатов'язність;
3. Конструктивні рішення відповідно до аналізу потенційно можливих пошкоджень.

Варіанти поведінки конструкції при цьому в аварійному стані можуть бути такими:

1. Конструкція не досягає I та II граничного стану;
2. Конструкція не досягає I граничного стану;
3. Конструкція досягає I та II граничного стану, але при цьому повинні зберегтися шляхи евакуації.

Користуючись рекомендаціями норм проектування, збільшуємо переріз розпірного кільця в напрямку дії моменту, від якого відбувається руйнування нижнього розпірного кільця. Цей метод дозволяє зберегти нижнє розпірне кільце після аварійної ситуації, воно і далі працюватиме. Це дозволить передавати зусилля між двома іншими колонами і не призведе до ситуації коли одна колона забере на себе навантаження від тієї, що вийшла з роботи.

Також, як варіант запропоновано поставити додаткові в'язі між колонами та розпірним кільцем. Це в свою чергу забезпечить перерозподіл навантаження між в'язями, поясом та колонами, після моделювання аварійної ситуації. Завдяки цьому у розпірному поясі зростання моментів буде не суттєвим, і причин для руйнування ділянки нижнього розпірного поясу не буде. Відносно металоемності цей варіант є переважним.

Висновок: Найбільш небезпечний сценарій впливає з виключення із роботи середньої колони. Виключення колони призводить до збільшення згинальних моментів в ригелі в 3 рази, а в колоні в 5 разів. Розрахунок на прогресуюче руйнування повинен вноситись до техніко-економічного обґрунтування доцільності будівництва та при порівнянні варіантів конструктивних схем.

Зрештою, мають бути розроблені спеціальні норми із проектування сталевих каркасів великопролітних споруд.

Література

1. Єврокод Основы проектирования конструкций (EN1990:2002, IDT) ДСТУ–Н Б EN 1990:2008. – Київ, МінрегіонбудУкраїни, 2012.
2. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с.
3. Гарднер Л. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 3: Проектирование стальных конструкций. EN 1993-1-1, EN 1993-1-3, EN 1993-1-8. – М., МГСУ, 2012. – 224 с.
4. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкции. – К.: Изд-во Укрниипроектстальконструкция, 1999. – 212 с.
5. Липницкий М.Е. Купола (расчет и проектирование) – Л.: Стройиздат, 1973. – 129 с.
6. Качуровский А., Лизогуб Е. Конструктивное решение легкой структурной оболочки большепролетного купола. – Архитектурно-строительный портал, 2006. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ais.by/story/772>
7. Лавріненко Л.І., Уманець Д.В. Особливості проектування та аналіз конструктивного рішення металевого купольного покриття аквапарку // Містобудування та територіальне планування. – К., КНУБА, 2013. Вип. 50. - С. 328 – 335

Аннотация

Выполнен анализ стержневого ребристого купола, построена его стержневая модель и выделены элементы, напряженно-деформированное состояние которых способствует наиболее неблагоприятной ситуации единичной живучести. Рассмотрен сценарий прогрессирующего разрушения. Приводятся результаты проектирования в соответствии с нормами Еврокод, а также альтернативные варианты повышения живучести сооружения.

Ключевые слова: стержневой купол, опорный контур, прогрессирующее разрушение, живучесть.

Abstract

An analysis of the rod ribbed dome was made, its core model was created and certain elements whose properties lead to the most unfavorable situation of unit survivability were determined. The scenario of progressive collapse is reviewed. Design according to Eurocode is presented along with alternative designs improving robustness of the building.

Keywords: ribbed dome, bearing contour, progressive collapse, robustness