

## ПРОСТОРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СУЧАСНИХ ОБОЛОНОК ПОКРИТЬ

**Коломійчук Г.П.**, к.т.н., доцент,  
gp11klm@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4484-7791

**Коломійчук В.Г.**, студентка,  
veronika.kolomy@gmail.com

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

**Анотація.** Розглянуто конструкції що змінюють свої геометричні розміри, тобто трансформуються під час експлуатації, для вирішення завдань по створенню належного мікроклімату в середині будівель та споруд. В дослідженні виділено тільки просторові конструкції що складаються з елементів нелінійного переміщення у просторі. Наведені сучасні способи трансформації конструкцій, що отримали найбільш високу оцінку під час експлуатації, і є перспективним для подальшого дослідження та розвитку. Для прикладів використані конструкції експлуатація і будівництво яких контролюється за допомогою комп'ютерних програм. На основі аналізу зведених за допомогою трансформації оболонок різної форми отримані математичні моделі для визначення їх оптимальних габаритних розмірів і можуть бути використані в проектуванні нових оболонок.

**Ключові слова:** просторова трансформація оболонок, розумні конструкції, адаптивна архітектура, оптимальні розміри оболонок, реконструкція.

**Вступ.** Трансформовані просторові конструкції будівель та споруд – складова частина сучасної адаптивної архітектури, що сприймає нові вимоги суспільства та пристосовує їх в будівлях та спорудах. Потреба в динамічній адаптації архітектурних об'єктів обумовлена необхідністю усунення протиріччя між постійно зростаючими і мінливими потребами людей і незмінюваністю характеристик середовища [1]. Проектування трансформованих просторових конструкцій сприяє зменшенню негативного впливу будівель та споруд на навколишнє середовище, скороченню витрат на енергоспоживання, що безперечно сприятиме сталому розвитку міського середовища. Розвиток трансформації конструкцій в першу чергу пов'язаний з впровадженням інформаційно-комп'ютерних технологій.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Особливе місце серед великогабаритних трансформованих космічних систем займають просторові конструкції, розкриття яких відбувається автоматично при спрацьовуванні запобіжного механізму за рахунок початкової накопиченої енергії пружин, розташованих в шарнірних з'єднаннях [2]. Вони складаються з двох поясів, з'єднаних між собою діагональними стрижнями. На рис. 1 наведено рефлектор антени просторової конструкції в розкритому стані.

Стрижні просторової конструкції можуть бути виконані як з металу, так і з композиційного матеріалу. На рис. 2 показано конструкції вузлового шарніру і шарніру в стрижні що здатний складатися.

Розвиток способу розгортання великогабаритних конструкцій передбачає застосування автоматичних систем в яких для розкриття використовується електрична енергія. Автоматичні актуатори дають можливість керувати процесом розкриття, зменшують коливання та прогини конструкції.

В огляді [3] наведено великопролітні конструкції покриття що трансформуються. Розглянуті конструкції монтаж яких виконувався за способом «Pantadome System», а також існуючі великопролітні покриття з простою трансформацією.

Застосування трансформації в архітектурі сучасних унікальних суспільних будівель та споруд в яких закладені біонічні підходи розглянуті в [4, 5]. Використання трансформації в архітектурі будівель та споруд збільшує їх багатofункціональність та дозволяє створювати унікальні форми та конструктивні рішення.

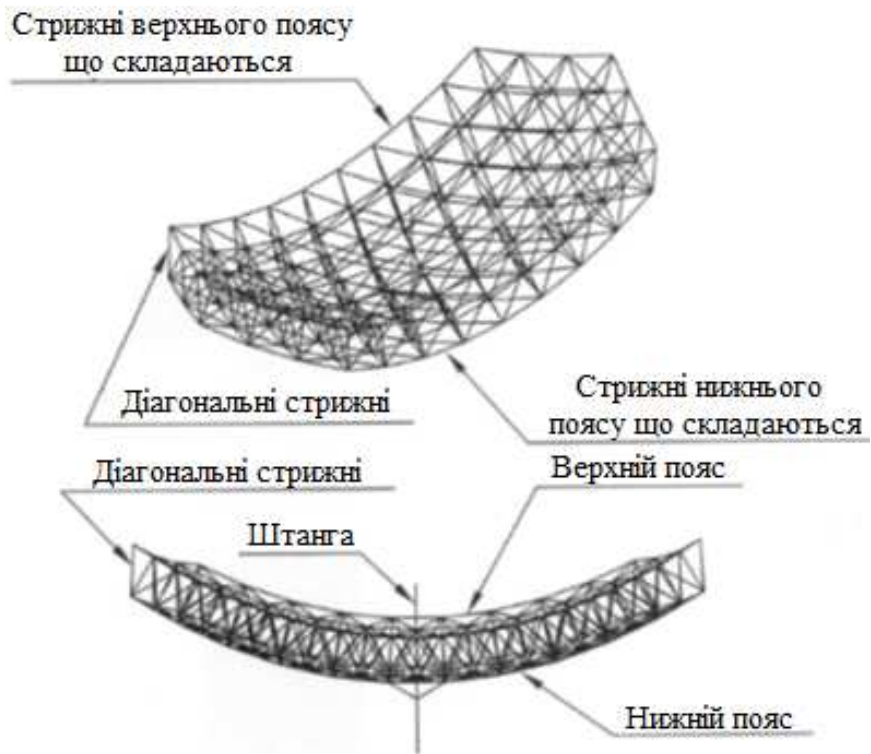


Рис.1. Просторова конструкція рефлектора антени



Рис.2. Вузлові шарніри, що з'єднують діагональні стрижні зі стрижнями що складаються верхнього і нижнього поясів (а), шарнір, що з'єднує елементи стрижня що складається (б)

В науковій роботі [6] розроблено нові концепції по розкриттю конструкцій що використовуються в мобільних будівлях та спорудах. Починаючи з вибору необхідної геометрії на основі архітектурно релевантних параметрів, оцінюючи кінематику конструктивної системи та виконуючи дослідження техніко-економічного обґрунтування, продемонстровано повний процес проектування, що розкриває сильні та слабкі сторони конструкцій що трансформуються.

Незважаючи на велику кількість існуючих просторових покриттів що трансформуються в них використовується проста трансформація, а запропоновані вражаючі моделі з просторовою трансформацією, через механічну складність їх систем під час процесу складання і розгортання, не побудовані в натуральну величину.

**Мета та завдання.** Метою даного дослідження є вибір раціональних конструктивних рішень сучасних оболонок покриттів що просторово трансформуються, їх аналіз та розробка математичних моделей що дозволяють отримувати оптимальні розміри для проектування.

На відміну від подібних досліджень інших авторів, де здебільшого виконувався архітектурний огляд трансформації оболонок, в даній роботі виконано огляд конструктивних рішень складної трансформації оболонок.

Завдання дослідження: виконати аналіз розвитку сучасних конструктивних рішень просторової трансформації оболонок; виявити оболонкові покриття різної форми побудовані

за допомогою трансформації; отримати математичні моделі що допомагають визначати оптимальні розміри оболонок, побудованих за допомогою трансформації, та використовувати в проектуванні нових конструкцій.

**Матеріали та методика дослідження.** Трансформовані просторові конструкції – складова частина унікальних будівель та споруд. Найчастіше просторова трансформація використовується для підйому оболонок покриття в проектне положення та при експлуатації під час розкриття частини, або всієї оболонки покриття.

В силу малої кількості однотипних конструктивних рішень оболонок покриття з просторовою трансформацією для аналізу вибрані лише ті що отримали найбільш високу оцінку під час експлуатації, і є перспективними для подальшого дослідження та розвитку.

**Результати досліджень.** Розширюючи роботу над двовимірними конструкціями висувних пластин, в науковій роботі [7] запропоновано елегантне рішення для просторових висувних купольних конструкцій, використовуючи тільки фрагменти оболонок замість комбінації багатокутних елементів і накладок. Однією з пропозицій автора є новий тип куполу що трансформується. Існуюча просторова конструкція не має будь-яких перекриттів, і, отже, усувається тертя між сусідніми оболонковими елементами, що робить її більш придатною для великопролітних застосувань. Іншими перевагами конструкції куполу є можливість зміни меж оболонкових елементів і розташування нерухомих точок, навколо яких вони обертаються. На рис. 3 показаний купол що трансформується з симетрично розташованими оболонковими елементами, що мають фіксовані точки обертання. Елементи оболонки забезпечують вільну поверхню у відкритому і закритому положенні.

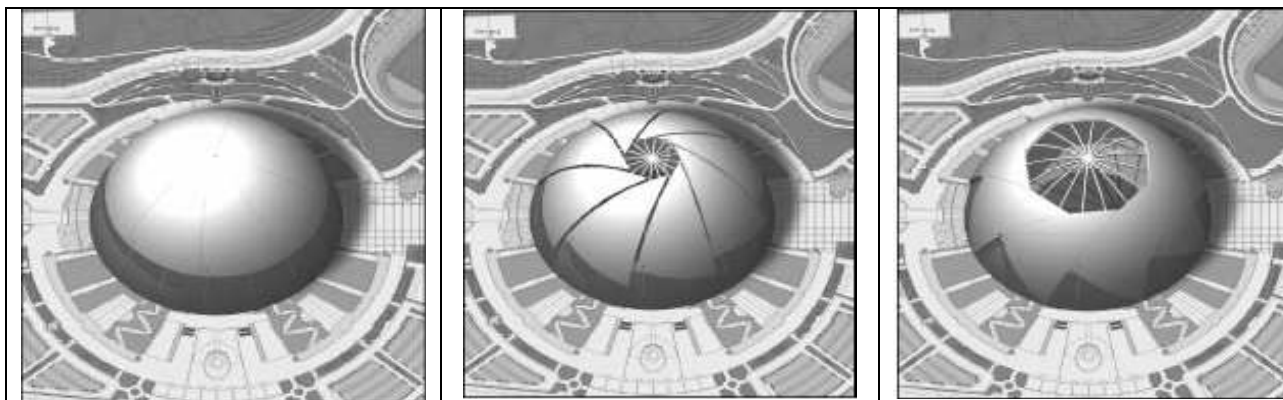


Рис.3. Купол з оболонкових елементів з фіксованими точками обертання: а) закритий стан покриття; б) 8 оболонкових елементів в проміжному стані; в) розкритий стан покриття

Проте, в найближчому майбутньому в будівництві, необхідно зробити так, щоб конструкція мала живий рух, гнучкість і, крім того, інтелект. Зокрема, конструкція змінюється в форму, гармонізовану з навколишнім середовищем, і зміна форми реалізує більш універсальну функцію. В одному з механізмів, які роблять можливим більш складний рух, є просторова ферма зі змінною геометрією, яка названа VGT (Variable Geometry Truss – ферма змінної геометрії) [8]. Спочатку конструкція VGT була розроблена в якості робочого механізму космічного апарату і була доповнена невеликим двигуном для виконання різних завдань в космічному просторі.

Як показано на рис. 4,а, VGT - це просторова конструкція, яка складається з пружних елементів і шарнірів. Контролюючи довжину пружних елементів, можна створити різні форми просторової конструкції. Приклад зміни форми, що поєднує два розміри VGT послідовно, показаний на рис. 4,б. Під час розтягування одного пружного елемента VGT кожен два промені що з'єднані з ним змінюється у нову форму, коли він рухається. Розтягуючи пружні елементи разом, конструкція змінюється, як пружина. Переміщення елементів VGT виконується за допомогою гідравлічних домкратів, дії яких і в свою чергу контролюються комп'ютерною програмою.

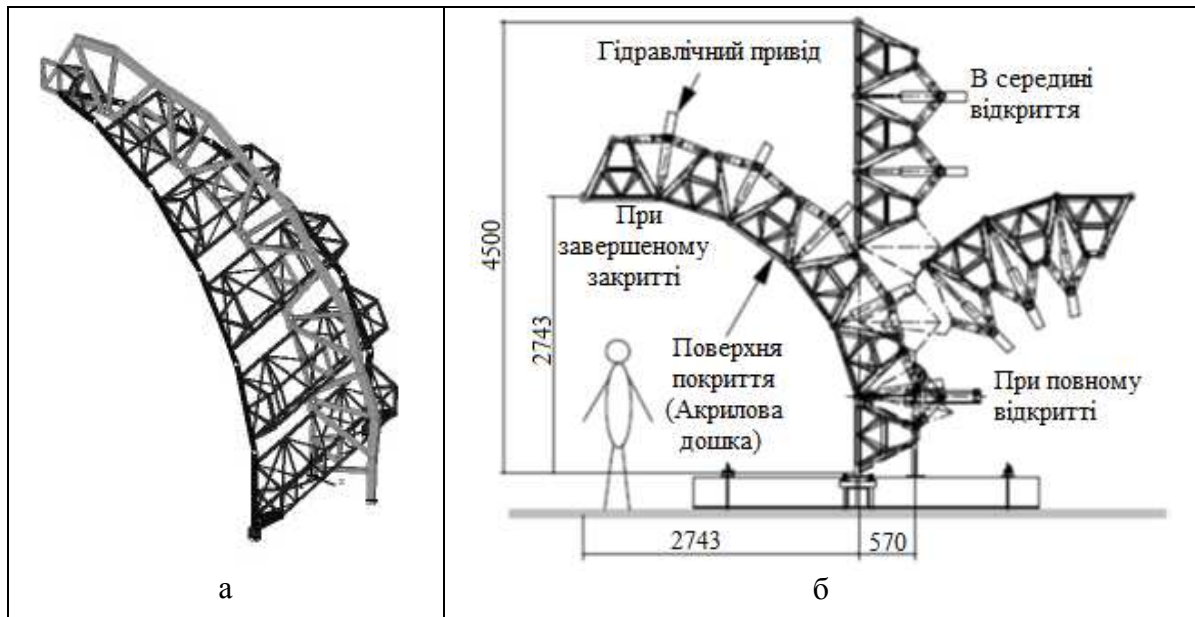


Рис. 4. Просторова конструкція ферми змінної геометрії: а) елемент VGT в закритому стані; б) граничні положення елемента VGT в закритому та розкритому станах

На рис. 5 наведено авторську розробку [8] купольного покриття що трансформується за складною траєкторією, утвореного з 10 ферм змінної геометрії.

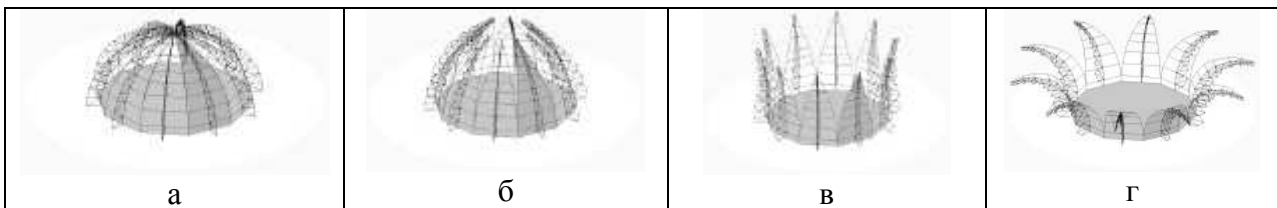


Рис. 5. Моделювання закриття та розкриття куполу: а) закритий стан; б) напівзакритий стан; в) розкритий стан з вертикальним положенням елементів VGT; г) граничний розкритий стан

Професор М. Кавагучі [9] розробив систему під назвою «Pantadome System», яка використовується для створення просторових покриттів, що трансформуються в процесі зведення. Основний принцип «Pantadome System» полягає в тому, що просторова конструкція перетворюється в геометрично змінну тільки на період її зведення. Це досягається тим, що окремі елементи, на які розділена оболонка, з'єднуються між собою тимчасовими конструктивними шарнірами. Збірка елементів проводиться на рівні землі. Кількість шарнірів призначається мінімальною для того, щоб конструкцію можна було підняти за меншу кількість точок і, в той же час, в процесі підйому окремі елементи оболонки могли вільно повертатися, утворюючи механізм. На рис. 6 показано приклад підйому трансформованого покриття у вигляді сітчастого металеве куполу, розділеного на окремі елементи трьома кільцевими лініями шарнірів. Розташувавши «складену» конструкцію, як показано на рис. 6, а, і встановивши домкрати в точках з шарнірами №1, можна підняти купол в проектне положення (рис. 6, в).

У 1996 році в місті Кадома префектури Осака побудований універсальний спортивний центр з залом в формі овалу. Габаритні розміри: – довжина 127 м; – ширина 110 м; – висота 42 м. Покриття будівлі являє собою двопоясну сітчасту металеву оболонку висотою 1,5 м з невеликим нахилом по довжині що складає 5°. Унікальність універсального спортивного центру в тому, що просторова конструкція його покриття, трансформована в процесі підйому за принципами «Pantadome System». Перед підйомом оболонка покриття була розділена по периметру трьома лініями тимчасових конструктивних шарнірів, за допомогою яких вона

являла собою механізм (кінематично змінну конструкцію), як показано на рис. 7. Сітчаста металева оболонка розділена на три частини (монтажні блоки): центральну, середню і нижню

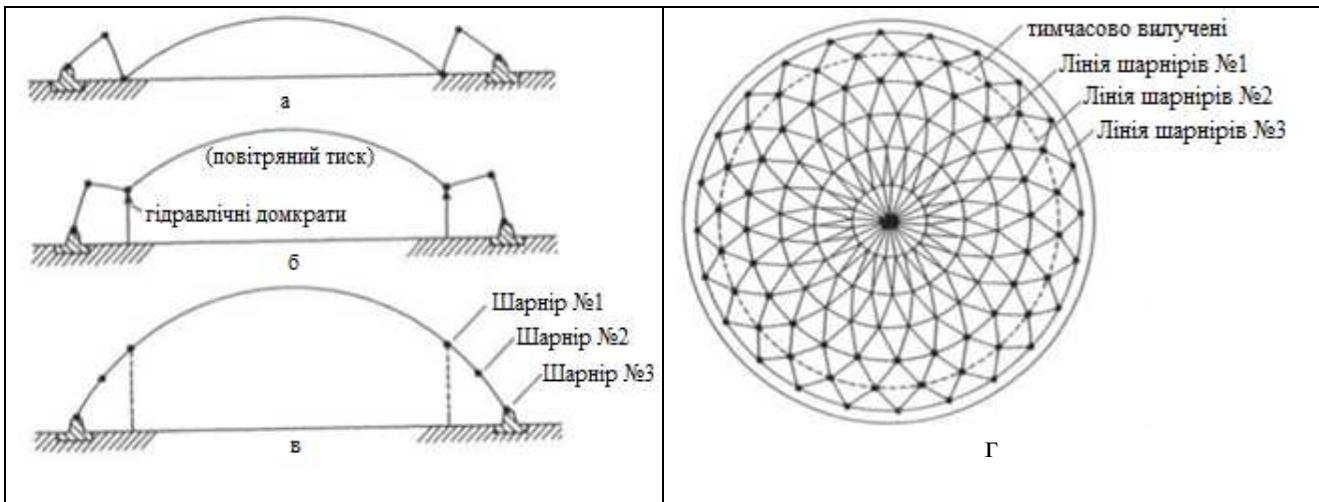


Рис. 6. Підйом сітчастого металевого куполу: а) складена конструкція перед підйомом; б) проміжний стан підйому; в) конструкція в проектному положенні; розміщення тимчасових шарнірів на плані покриття

(опорну). Найбільша центральна частина, з розмірами в плані 86х66 м, з'єднана тимчасовими шарнірами №1 з середньою частиною. Середня і нижня частини, в свою чергу, розділені лініями шарнірів №2 на 14 монтажних блоків.

Центральна частина оболонки покриття зібрана на риштованні на невеликій відстані від поверхні землі. Блоки нижньої частини покриття опиралися (в місцях шарнірів №3) на залізобетонну кільцеву оболонку, верхня площина якої нахилена до горизонту на 5°. Підйом металевої оболонки покриття в проектне положення здійснювався 16 гідравлічними домкратами, розташованими по периметру центрального монтажного блоку, і з'єднаними з ними висувними монтажними стійками (рис. 7). За допомогою домкратів оболонка покриття піднята в проектне положення на висоту 28,74 м, після чого виконана заміна тимчасових шарнірів жорсткими зв'язками і жорстке з'єднання між собою окремих блоків по лініях перерізів. Весь процес підйому покриття проводився під контролем спеціальної комп'ютерної програми.

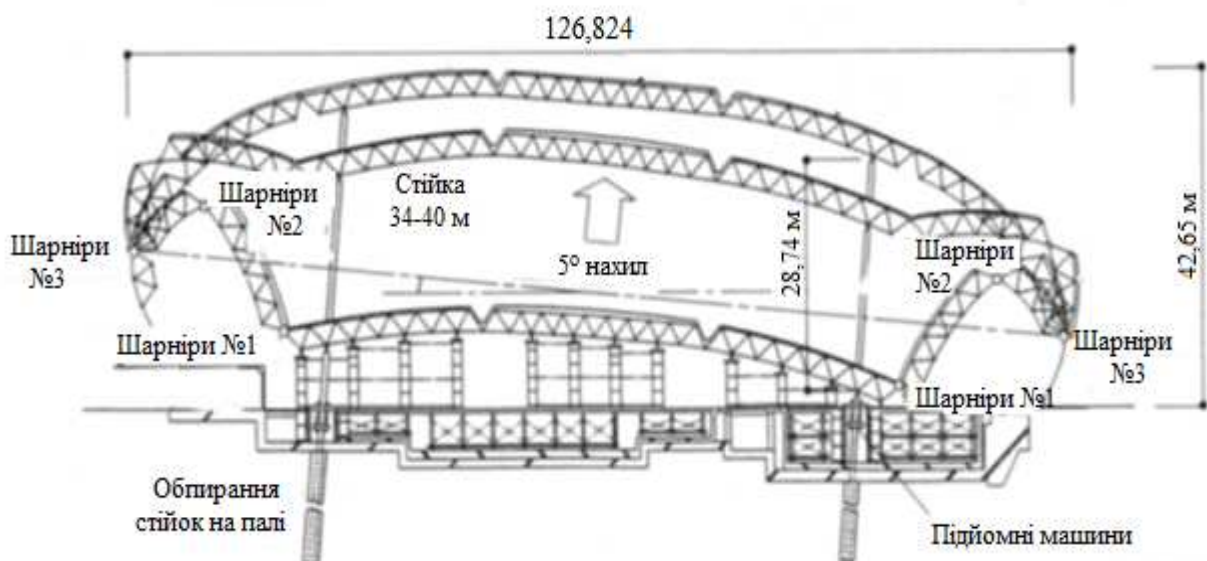


Рис. 7. Етапи зведення металевої сітчастої оболонки за принципами «Pantadome System»

В Хатіві (Іспанія) виконано реконструкцію арени для бою биків з влаштуванням покриття над трибунами у вигляді металевого куполу [10]. Оболонка покриття зведена за допомогою нового способу «Pantadome System». Купол сферичної форми з центральним отвором діаметром 42 м і зовнішнім діаметром 101,6 м, опертий на 44 колони, розподілених по колу діаметром 86,4 м. Несуча конструкція покриття утворена ґратами радіальних ферм, прикріплених до колон і внутрішнього кільця. Вона підтримується дією зовнішнього натяжного кільця, за допомогою елементів радіального натягу, а також розтягуванням (верхній пояс) та стисненням (нижній пояс) у внутрішньому кільці. Конструкція покриття зібрана на поверхні землі (рис. 8 а, б) і піднята в проектне положення шляхом укорочення 44 радіальних канатів з домкратами, прикріплених до внутрішнього кільця. Весь процес підйому покриття проводився під контролем спеціальної комп'ютерної програми.



Рис.8. Елементи куполу перед початком підйому:

а) збірка металевих ферм; б) внутрішнє кільце з закріпленими гідравлічними домкратами

Особливість «Pantadome System» в Хатіві – це відсутність тимчасових вертикальних домкратів. Замість них для переміщення внутрішнього кільця вгору, було застосовано укорочення 44 елементів радіального натягу, що з'єднують нижні вузли решітки ферм з нижнім поясом внутрішнього кільця. Підйом куполу показано на рис. 9. Загальна вага конструкції покриття склала 4530 кН. Під час зведення покриття шарнірно закріплені опорні колони повернулися відносно вертикалі на кут від  $+21,3^\circ$  (внутрішній початковий нахил) до вертикального положення з максимальним нахилом назовні  $-3,4^\circ$  в проміжному положенні. Внутрішнє кільце перемістилося на висоту 16,87 м, а довжина нижніх радіальних елементів ферм скоротилася на 5,33 м.

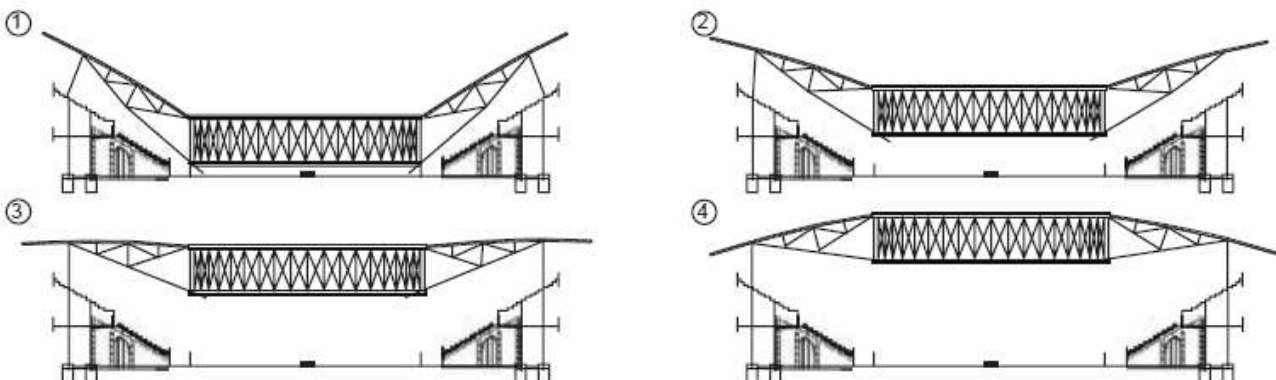


Рис.9. Етапи зведення куполу за принципами «Pantadome System». Поперечний переріз

Трансформацію плоскої плити в оболонку додатної кривизни можна виконати, якщо вона складається з ортотропного матеріалу, який дозволяє великі деформації при низькій напрузі в одному напрямку і набагато міцніший в іншому. В статті [11] наведено спосіб,

завдяки якому плоска пластина з міцного матеріалу (наприклад, клеєної деревини, бетону) і м'якого компоненту (наприклад, полістиролу) за допомогою пневматичної опалубки та натягу металевих канатів по контуру трансформується в оболонку додатної кривизни.

Для прикладу обраний купол діаметром 12 м і висотою 2,16 м. На поверхні землі виготовлена плоска кругла плита з 32 сегментів діаметром 13 м (рис. 10, а). Товщина двошарової плити складала 100 мм (нижній шар полістиролу – 50 мм, верхній шар залізобетону – 50 мм). По контуру утворено залізобетонне ребро шириною 150 мм і товщиною 120 мм для розміщення двох канатів натягу під час трансформації.

На рис. 10 б, в наведено результати трансформації плоскої круглої плити в купол. Спочатку центр плити підняли на 20 мм за допомогою пневматичної опалубки для компенсації власної ваги оболонки. Максимальний тиск склав 6 мбар. Потім одночасно навантажені металеві канати в обох анкерних блоках до 40 кН. Збільшення напруги канатів привело до зменшення діаметру і підйому центру оболонки. Коли було досягнуто остаточної трансформації, канати були закріплені з двох боків на якорях. Під час трансформації плити в купол зменшилися: – радіус кривизни від нескінченного для пластини до 9,365 м; – діаметр з 13 м до 12 м; – сегменти полістиролу по колу від 144 мм до 38 мм.

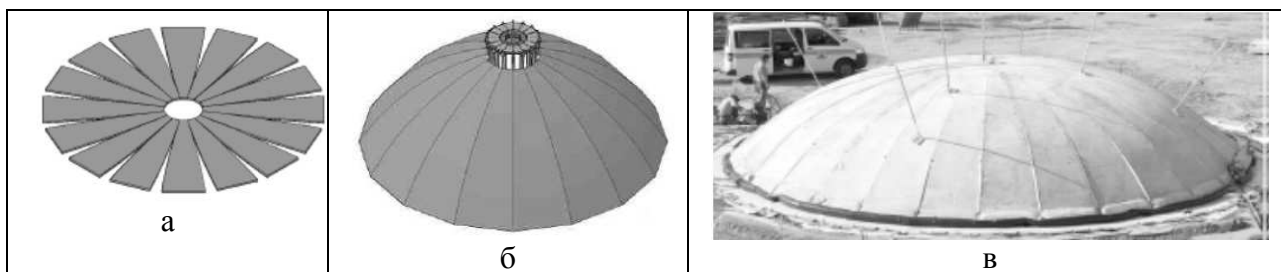


Рис. 10. Трансформація плоскої круглої плити в купол: а) схема плоскої плити на поверхні землі; б) схема куполу в проектному положенні; в) модель куполу в зведеному стані

В науково-практичній літературі не достатньо матеріалів для виконання аналізу оболонок що просторово трансформуються під час експлуатації і тому було виконано дослідження оболонок що трансформуються під час зведення за допомогою пневматичної опалубки. Показники досліджених сучасних натурних оболонкових покриттів різної геометрії дали можливість отримати математичні моделі, що дозволяють виконувати попередню оцінку нових конструкцій оболонок на стадії проектування (таблиця 1). В таблиці  $Y(I)$  – відношення стріли підйому до прольоту (діаметру) оболонки покриття в плані.

Таблиця 1

Математичні моделі оболонок різної геометрії

Поверхня оболонки покриття	Висота оболонки, м
Купол, діаметром 30 – 150 м	$Y(1) = (-0,0048 \times D^2 + 1,6095 \times D + 76,3304) \times 10^{-3}$
Додатної кривизни, розміром 30 – 120 м	$Y(2) = (-0,0526 \times L^2 + 7,8325 \times L + 128,2428) \times 10^{-3}$
Від'ємної кривизни, розміром 30 – 90 м	$Y(3) = (-0,0124 \times L^2 + 3,5285 \times L + 29,9667) \times 10^{-3}$
Шатрового типу, розміром 20 – 80 м	$Y(4) = (-0,0199 \times L^2 + 4,6748 \times L + 120,7339) \times 10^{-3}$
Довга циліндрична, розміром 15 – 45 м	$Y(5) = (0,0057 \times L^2 + (-0,8143) \times L + 86,5095) \times 10^{-3}$
Коротка циліндрична, розміром 30–150 м	$Y(6) = (-0,0025 \times L^2 + 0,7035 \times L + 209,4094) \times 10^{-3}$

**Висновки.** Для досягнення мети виконано аналіз розвитку сучасних конструктивних рішень просторової трансформації оболонок, що отримали найбільш високу оцінку під час експлуатації, і є перспективним для подальшого дослідження та розвитку. Найбільш раціональними є конструктивні рішення трансформованих покриттів зі змінною формою що аналізуються комп'ютерними програмами, а їх трансформація виконується робототехнікою. Математичні моделі побудовані за результатами обробки великої кількості оболонок різної

геометрії, зведених за допомогою пневматичної опалубки, а їх використання дає можливість визначати висоту оболонки при проектуванні.

Для подальших досліджень важливо дослідити можливість розповсюдження принципів «Pantadome System» на оболонки складної геометрії, а також просторову трансформацію оболонок з застосуванням робототехніки.

### Література

1. Шаталюк Ю. В. Принципи формування адаптивної архітектури в контексті сталого розвитку міського середовища: дис. ... кандидата архітектури: 18.00.02 / Ю. В. Шаталюк. – Харків: ХНУБА, 2018. – 246 с.
2. Зимин В.Н. Экспериментальное определение динамических характеристик крупногабаритных трансформируемых космических конструкций / В.Н. Зимин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”, 2011. – №1. – С. 47-56.
3. Шугаев В.В. Трансформируемые большепролетные конструкции покрытий / В.В. Шугаев // Пространственные конструкции зданий и сооружений (Исследования, расчет, проектирование и применение). – М.: МОО «Пространственные конструкции», 2008. – Вып. 11. – С. 212-219.
4. Asefi M. Nature and Kinetic Architecture: The Development of a New Type of Transformable Structure for Temporary Applications / M. Asefi, A. Foruzandeh // Journal of Civil Engineering and Architecture (USA), 2011. – Vol. 5. – No. 6. (Serial No. 43). – P. 513-526.
5. Asefi M. Transformation and movement in architecture: the marriage among art, engineering and technology / M. Asefi // Procedia – Social and Behavioral Sciences, 2012. –Vol. 51. – P. 1005-1010.
6. De Temmerman, N. Design and Analysis of Deployable Bar Structures for Mobile Architectural Applications. Dissertation submitted in fulfilment of the requirements for the award of the degree of Doctor in de Ingenieurswetenschappen (Doctor in Engineering) Vrije Universiteit Brussel. – Brussels, 2007.
7. Jensen, F.V. Concepts for retractable roof structures. Dissertation submitted to the University of Cambridge for the degree of Doctor of Philosophy. – Cambridge, 2004.
8. Inoue F. Development of Adaptive Construction Structure by Variable Geometry Truss / F. Inoue // Robotics and Automation in Construction, 2008, P. 253-272.
9. Kawaguchi M. Application of pantadome system to long-span roof structures / M. Kawaguchi // IABSE reports, 1994. – Vol. 71. – P. 91-100.
10. Lazaro C. Detailing and construction of the pantadome roof structure for a bullring in Xativa (Spain) / C. Lazaro, A. Domingo // International Journal of Space Structures, 2010. – Vol. 25. – No. 4. – P. 229-241.
11. Kollegger J. The building of ice and concrete shells by employing pneumatic formwork / J. Kollegger, B. Kromoser, S. Dallinger // Proceedings: Second International Conference on Flexible Formwork. Bath, University of Bath, 27-29 June 2012.

### References

- [1] Shatalyuk YU. V. Pryntsypy formuvannya adaptivnoyi arkhitektury v konteksti staloho rozvytku mis'koho seredovyshcha: dys. ... kandydata arkhitektury: 18.00.02 / YU. V. Shatalyuk. – Kharkiv: KHNUBA, 2018. – 246 s.
- [2] Zimin V.N. Eksperimental'noye opredeleniye dinamicheskikh kharakteristik krupnogabaritnykh transformiruyemykh kosmicheskikh konstruktsiy / V.N. Zimin // Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. “Mashinostroyeniye”, 2011. – №1. – S. 47-56.
- [3] Shugayev V.V. Transformiruyemyye bol'sheproletnyye konstruktsii pokrytiy / V.V. Shugayev // Prostranstvennyye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy (Issledovaniya, raschet,



- projektirovaniye i primeneniye). – М.: МОО «Prostranstvennyye konstruksii», 2008. – Вып. 11. – С. 212-219.
- [4] Asefi M. Nature and Kinetic Architecture: The Development of a New Type of Transformable Structure for Temporary Applications / M. Asefi, A. Foruzandeh // Journal of Civil Engineering and Architecture (USA), 2011. – Vol. 5. – No. 6. (Serial No. 43). – P. 513-526.
- [5] Asefi M. Transformation and movement in architecture: the marriage among art, engineering and technology / M. Asefi // Procedia – Social and Behavioral Sciences, 2012. – Vol. 51. – P. 1005-1010.
- [6] De Temmerman, N. Design and Analysis of Deployable Bar Structures for Mobile Architectural Applications. Dissertation submitted in fulfilment of the requirements for the award of the degree of Doctor in de Ingenieurswetenschappen (Doctor in Engineering) Vrije Universiteit Brussel. – Brussels, 2007.
- [7] Jensen, F.V. Concepts for retractable roof structures. Dissertation submitted to the University of Cambridge for the degree of Doctor of Philosophy. – Cambridge, 2004.
- [8] Inoue F. Development of Adaptive Construction Structure by Variable Geometry Truss / F. Inoue // Robotics and Automation in Construction, 2008, P. 253-272.
- [9] Kawaguchi M. Application of pantadome system to long-span roof structures / M. Kawaguchi // IABSE reports, 1994. – Vol. 71. – P. 91-100.
- [10] Lazaro C. Detailing and construction of the pantadome roof structure for a bullring in Xativa (Spain) / C. Lazaro, A. Domingo // International Journal of Space Structures, 2010. – Vol. 25. – No. 4. – P. 229-241.
- [11] Kollegger J. The building of ice and concrete shells by employing pneumatic formwork / J. Kollegger, B. Kromoser, S. Dallinger // Proceedings: Second International Conference on Flexible Formwork. Bath, University of Bath, 27-29 June 2012.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ПОКРЫТИЙ

**Коломийчук Г.П.**, к.т.н., доцент

gp11klm@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4484-7791

**Коломийчук В.Г.**, студентка

veronika.kolomy@gmail.com

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

**Аннотация.** В настоящее время в практике строительства уникальных большепролетных пространственных оболочечных покрытий чаще других используются принципы адаптивной архитектуры. Построенные здания и сооружения приобретают искусственный интеллект для экономичной и комфортной эксплуатации и могут с помощью компьютерных программ реагировать на меняющиеся условия внешних воздействий. Такие здания и сооружения состоят из конструктивных систем способных трансформироваться для удовлетворения нужд эксплуатации. Особая сложность проектирования трансформируемых пространственных конструктивных систем состоит в том, что в процессе эксплуатации значительно изменяется их расчетная схема, а все многочисленные экстремальные изменения необходимо заранее спрогнозировать.

Рассмотрены в статье конструкции, которые могут менять свои геометрические размеры, то есть трансформироваться во время эксплуатации, для решения задач адаптивной архитектуры по созданию надлежащего микроклимата внутри зданий и сооружений.

Выделены в исследовании только пространственные конструкции, состоящие из элементов сложного перемещения в пространстве, хотя существует много построенных трансформируемых оболочек покрытий с более простой трансформацией в пространстве (горизонтальной, вокруг вертикальной оси, по направляющим опорным элементам поверхности оболочек переноса).

Развитие таких конструкций имеет много направлений. Одно из сложнейших – развитие мобильных конструкций в космической отрасли, когда на орбиту доставляется крупногабаритная конструкция, упакованная в контейнер минимальных размеров, а на орбите она автоматически раскрывается до необходимых габаритов.

Приведены современные подходы в трансформации конструкций, получившие наиболее высокую оценку во время нового строительства, реконструкции и эксплуатации зданий и сооружений, и являются перспективными для дальнейших исследований и применения. Для примеров использованы пространственные оболочечные конструкции, а также те эксплуатация и строительство которых осуществляется с помощью компьютерных программ.

Выполнен анализ построенных оболочек различной формы с использованием пневматической опалубки для получения математических моделей, позволяющих определять оптимальные габаритные размеры и использовать в проектировании.

**Ключевые слова:** пространственная трансформация оболочек, умные конструкции, адаптивная архитектура, оптимальные размеры оболочек, реконструкция.

## SPATIAL TRANSFORMATION OF STRUCTURAL ELEMENTS OF MODERN COATINGS SHELLS

**Kolomiychuk G.P.**, PhD., Assistant Professor,  
gp11klm@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4484-7791

**Kolomiichuk V.G.**, student  
veronika.kolomy@gmail.com

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** Currently, the principles of adaptive architecture are most often used in the practice of building unique large-span spatial shell coverings. Constructed buildings and structures acquire artificial intelligence for economical and comfortable operation and can use computer programs to respond to changing environmental conditions. Such buildings and structures consist of structural systems capable of transforming to meet the needs of operation. The particular complexity of the design of transformable spatial structural systems is that their design scheme changes significantly during operation, and all numerous extreme changes must be predicted in advance.

Structures that can change their geometric dimensions, that is, transform during operation, are considered in the article to solve the problems of adaptive architecture to create the proper microclimate inside buildings and structures.

Only spatial structures consisting of elements of complex displacement in space were identified in the research, although there are many constructed transformable shells of coverings with a simpler transformation in space (horizontal, around a vertical axis, along the guiding support elements of the surface of the transfer shells).

The development of such structures has many directions. One of the most difficult is the development of mobile structures in the space industry, when a large-sized structure packed in a container of minimum dimensions is delivered into orbit, and in orbit it automatically opens to the required dimensions.

Modern approaches to the transformation of structures are given, which were highly appreciated during the new construction, reconstruction and operation of buildings and structures, and are promising for further research and application. For examples, spatial shell structures were used, as well as those operation and construction of which are carried out using computer programs.

The analysis of the constructed shells of various shapes using pneumatic formwork to obtain mathematical models to determine the optimal overall dimensions and use in the design.

**Keywords:** spatial transformation of shells, smart constructions, adaptive architecture, optimal shell sizes, reconstruction.