

## МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО КУПОЛА В AUTODESK REVIT ТА ПЕРЕДАЧІ МОДЕЛІ В ПК ЛІРА-САПР

**Томашевський А.В.**, магістрант,  
**Люльченко Є.В.**, к.т.н., доцент,  
*ДВНЗ «Криворізький національний університет»*  
tomashevsky.a.v.@gmail.com

**Анотація.** Для активного впровадження геодезичних куполів і оболонок в практику проектування і будівництва необхідна розробка методики моделювання та комплексного використання моделі геодезичного купола в архітектурно-будівельному проектуванні, міцнісних розрахунках та конструюванні. Основним завданням на даний час є забезпечення процесу обміну даними між програмними комплексами та автоматизація їх роботи. В даному дослідженні було запропоновано розв'язання вказаної задачі за допомогою середовища інформаційного моделювання будівель Autodesk Revit з розширенням для візуального програмування Dynamo спільно з ПК ЛІРА-САПР. Опрацьовано методику передачі моделей з середовища Autodesk Revit до програмного комплексу ЛІРА-САПР за допомогою штатних засобів імпорту та експорту ПК САПФІР, а також розроблено транслятор в текстовий файл задачі, виконаний у середовищі Dynamo.

**Ключові слова:** геодезичний купол, інформаційне моделювання будівель, візуальне програмування, транслятор моделі.

## МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КУПОЛА В AUTODESK REVIT И ПЕРЕДАЧИ МОДЕЛИ В ПК ЛИРА-САПР

**Томашевский А.В.**, магістрант,  
**Люльченко Е.В.**, к.т.н., доцент,  
*ГВУЗ «Криворожский национальный университет»*  
tomashevsky.a.v.@gmail.com

**Аннотация.** Для активного внедрения геодезических куполов и оболочек в практику проектирования и строительства необходима разработка методики моделирования и комплексного использования модели геодезического купола в архитектурно-строительном проектировании, прочностных расчетах и конструировании. Основной задачей в настоящее время является обеспечение процесса обмена данными между программными комплексами и автоматизация их работы. В данном исследовании было предложено решение указанной задачи при помощи среды информационного моделирования зданий Autodesk Revit с расширением для визуального программирования Dynamo совместно с ПК ЛИРА-САПР. Отработано методику передачи моделей из среды Autodesk Revit в программный комплекс ЛИРА-САПР с помощью штатных средств импорта и экспорта ПК САПФІР, а также разработан транслятор в текстовый файл задачи, выполненный в среде Dynamo.

**Ключевые слова:** геодезический купол, информационное моделирование зданий, визуальное программирование, транслятор модели.

## METHODOLOGY OF MODELING THE GEODESIC DOME IN AUTODESK REVIT AND TRANSFERING MODELS TO LIRA-SAPR

**Tomashevskiy A.V.**, Undergraduate,  
**Lulchenko E.V.**, PhD, Associate Professor,  
*SIHE "Kryvyi Rih National University"*  
tomashevsky.a.v.@gmail.com

**Abstract.** For active implementation of geodesic domes and shells in design and construction practice, it is necessary to develop a methodology of modeling and integrated using of the geodetic dome model in architectural and structural design and strength analysis. The main task now is to ensure the process of data exchange between software packages and to automate their work: to develop ready-made software solutions or user applications for constructing geometric models of geodesic domes and shells, to transfer models into FEM-packages and to return analysis results to the BIM-environment. In this study, a solution was proposed, using the Autodesk Revit as BIM-software and the extension for visual programming Dynamo together with LIRA-SAPR. It was worked out the technique of transferring models from the Autodesk Revit to LIRA-SAPR using standard import and export tools of SAPFIR. The translator was also developed into a model text file based on Dynamo environment.

**Keywords:** geodesic dome; building information modeling; visual programming; model translator.

**Постановка проблеми.** Геодезичний купол – це архітектурна конструкція, утворена апроксимацією криволінійної поверхні (сферичної, еліптичної, параболічної) деяким багатогранником. Зазвичай основою для апроксимації виступають правильні та напівправильні багатогранники, грані яких також можуть поділятися на елементи з певною частотою розбиття.

Геодезичний купол має складну геометричну форму, для передачі уявлення про яку не достатньо ортогональних проєкцій. Тому для проєктування конструкцій на основі геодезичного розбиття необхідно використовувати об'ємні побудови. Але і звичайне 3D-моделювання вже не відповідає вимогам часу: концептуальна геометрична модель геодезичного купола може бути лише підосновою для майбутнього архітектурного-будівельного проєктування, міцнісних розрахунків та конструювання елементів споруди.

Стрімкий розвиток потужних і масових програмних комплексів з інформаційного моделювання будівель та міцнісних розрахунків конструкцій значно спростив процес проєктування конструкцій на основі складних геометричних форм.

Основним завданням на даний час є забезпечення процесу обміну даними між програмними комплексами та автоматизація їх роботи: розробка готових програмних рішень або користувацьких додатків для побудови геометричних моделей геодезичних куполів і оболонки, трансляції моделей до програмних комплексів з міцнісних розрахунків конструкцій та повернення результатів розрахунку до середовища інформаційного моделювання будівель.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження геодезичних куполів та оболонки паралельно розпочали в середині ХХ століття радянський науковець М. С. Туполев [1] і американський винахідник й інженер Р. Б. Фуллер [2]. Їх роботи стосувались основних засад проєктування конструкцій даного типу та вирішення питань втілення конкретних об'єктів. В останні десятиліття геодезичні куполи все більше приваблюють архітекторів та інженерів. Рядом вчених (Г. М. Павлов, А. М. Супрун, А. Я. Лахов та ін.) ведуться дослідження їхніх геометричних основ, розробляються класифікаційні системи даного сімейства конструкцій [3-6], пропонуються методики моделювання геометрії та трансляції моделей у розрахункові комплекси [7, 8], розробляються способи аналітичних розрахунків одноконтурних і двоконтурних оболонки на основі геодезичного розбиття від дії статичних

та динамічних навантажень [9, 10].

Основним напрямком сучасних досліджень є розробка комплексної методики проектування геодезичних куполів і оболонки: вибору геометричного рішення конструкції, автоматизованого побудування моделі, розрахунку та випуску проектної і робочої документації.

**Мета та завдання.** Для активного впровадження геодезичних куполів і оболонки в практику проектування і будівництва необхідна розробка методики моделювання та комплексного використання моделі геодезичного купола зі стрижневих та пластинчатих елементів в архітектурно-будівельному проектуванні, міцнісних розрахунках та конструюванні.

Метою даного дослідження було розв'язання вказаної задачі за допомогою програмного комплексу для інформаційного моделювання будівель Autodesk Revit з розширенням для візуального програмування Dynamo спільно з ПК ЛІРА-САПР. Об'єкт, що проектується, – будівля оранжереї з монолітним залізобетонним остовом та сталевим стрижневим геодезичним куполом покриття. Метою виконання проекту є створення деталізованої та функціональної інформаційної моделі та розробка проектної документації у середовищі Autodesk Revit.

**Підходи до створення геометричної моделі купола.** Складність форми геодезичного купола, відсутність очевидної симетрії та повторюваності елементів сітки розбивки значно ускладнюють проектування геодезичного купола у двовимірному просторі. Креслення в плані або в розрізі не дає точного уявлення про геометрію геодезичного купола та має супроводжуватись таблицею тригонометричних параметрів ребер та координат вузлових точок сітки. Тривимірна геометрична модель оболонки, виконана в одному з універсальних цифрових форматів, здатна певною мірою замінити собою текстові описи геометрії конструкції. Однак, і простої тривимірної моделі геодезичного купола не достатньо для ефективного використання її в проектуванні.

Для використання моделі в архітектурно-будівельному проектуванні та міцнісних розрахунках вона має бути параметризована і насичена інформацією про свої елементи: про марки складальних одиниць та фізичні властивості матеріалів конструкцій. Одним з можливих способів розв'язання даної задачі є побудова інформаційної моделі будівлі в середовищі Autodesk Revit із застосуванням розширення для візуального програмування Dynamo і трансляція моделі для міцнісного розрахунку у програмний комплекс ЛІРА-САПР за допомогою текстового файлу задачі.

Таким чином, можна виділити такі основні етапи моделювання куполів та оболонки: створення концептуальної геометричної моделі зі стрижнів і пластин; створення на її основі архітектурної моделі; трансляція концептуальної моделі в розрахунковий програмний комплекс з автоматизованим прикладанням навантажень; уточнення архітектурної моделі за результатами розрахунку, конструювання деталей і вузлів.

Першим етапом проектування є створення концептуальної геометричної моделі оболонки шляхом утворення геодезичної сітки розбиття на поверхні, що апроксимується. Такими поверхнями можуть бути сфера, еліпсоїд, параболоїд, а також і більш складні поверхні, форма яких обмежена лише можливістю застосування в будівельних конструкціях. Найбільш розповсюдженою поверхнею апроксимації є сфера, тому подальші твердження стосуватимуться переважно оболонки, утворених на основі сфери. Геометричними основами геодезичних оболонки виступають багатогранники (найчастіше правильні та напівправильні), елементи яких (найчастіше трикутної, п'ятикутної, шестигунової форми) розбиваються на частини за певними правилами. Кількість елементів розбивки вздовж одного ребра багатогранника називається частотою розбивки. Вона визначає точність апроксимації багатогранника-основи до поверхні. Власне правила розбивки елементів багатогранника визначають тип геодезичної оболонки, а параметри цього розбиття в сукупності з відомостями про поверхню та геометричну основу є найбільш вдалими класифікаційними ознаками оболонки.

Очевидно, що розбивка оболонки на елементи є найбільш трудомістким процесом моделювання геометрії, який слід виконувати автоматизовано. Розглянемо декілька механізмів побудови сітки розбиття з різним ступенем автоматизації.

1. Побудова сітки розбиття на типовому сферичному трикутнику за таблицею координат точок та одержання інших фрагментів сітки за допомогою афінних перетворень. Дані для цього методу мають бути представлені у вигляді таблиці координат точок, розрахованих попередньо. Цей спосіб виправданий лише для сферичних поверхонь та характеризується найнижчим ступенем автоматизації процесу. Також обмежена можливість варіативності при повторному використанні даних. Тип розбиття та багатогранник-основа є фіксованими, а змінюватися може лише радіус сфери, масштабуючи готове рішення.

2. Побудова сітки розбиття на гранях багатогранника та її центральне проєціювання на поверхню, що апроксимується. Спосіб добре підлягає автоматизації за умови розбиття грані групами прямих. Розбиття грані паралельними прямими, розташованими паралельно, перпендикулярно або під певним заданим кутом до однієї з граней, відповідає першому, другому та третьому класу розбивки відповідно. Даний спосіб також дозволяє проєціювати довільні рисунки розбиття граней, що можуть бути виконані, зокрема, в двовимірному графічному редакторі.

3. Побудова твердотільного багатогранника шляхом відсікання від кулі сферичних сегментів січними площинами, розташованими в просторі за заданими правилами. Даний спосіб найкращим чином підлягає автоматизації. Твердотільний тривимірний об'єкт формується послідовним виконанням циклу операцій: побудова чергової площини, перетин з об'єктом, видалення частини об'єкта, якій не належить центр сфери. З точки зору роботи з тривимірною графікою спосіб є найбільш вдалим, оскільки шуканий об'єкт містить у собі інформацію про власні вершини, грані, ребра та об'єм.

**Трансляція моделі купола до розрахункового програмного комплексу.** Для переходу від концептуальної геометричної моделі до повноцінної архітектурної необхідно побудувати на її основі об'ємні параметризовані конструктивні елементи. У середовищі Autodesk Revit за допомогою Дупато збирається інформація з концептуальної моделі та будується на її основі пластинчаті та стрижневі елементи з адаптивних компонентів, здатних змінювати свою форму відповідно до заданих вузлових точок.

З метою забезпечення високого рівня автоматизації розрахунку конструкцій доцільно використовувати розроблену в середовищі Autodesk Revit архітектурну інформаційну модель будівлі. Найкращим варіантом є пряма передача моделі з двостороннім зв'язком в розрахунковий програмний комплекс. Таку інтероперабельність підтримують, зокрема, Autodesk Robot або SOFiSTiK, проте задача може бути розв'язана і за допомогою вітчизняних САПР. До того ж специфічна форма конструкції вимагає автоматизованого прикладання навантажень, що може бути реалізовано за допомогою користувацького додатка чи скрипту на Дупато.

Специфіка задачі вимагає окремого формування розрахункової моделі для стрижневої сітчастої оболонки та остову будівлі, проте на фінальному етапі розрахунку доцільне поєднання моделей за допомогою режиму збирання у ПК ЛІРА-САПР (рис. 1).

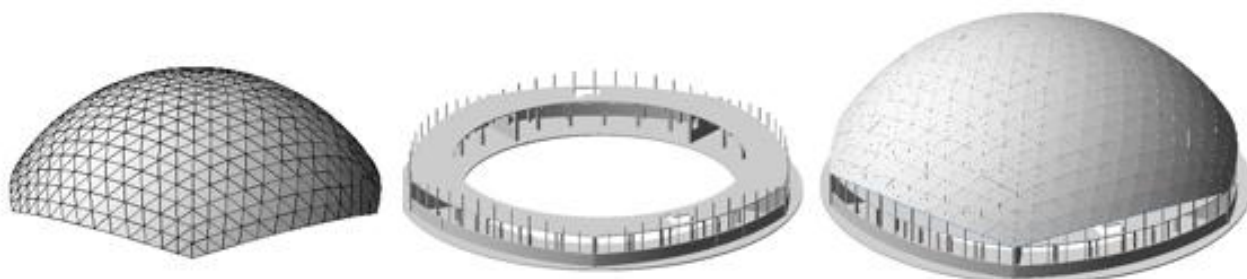


Рис. 1. Збирання моделей купола і остову в єдину розрахункову модель

Модель остову експортується за допомогою відкритого формату даних IFC у середовище ПК САПФІР. Слід зауважити, що, незважаючи на незначні похибки розпізнавання елементів геометрії, які вимагають втручання проектувальника, цей спосіб вирішення задачі з підготовки аналітичної моделі є вдалим. Так, у середовищі ПК САПФІР

передаються геометричні форми конструкцій, перерізи елементів, функціональні зони, яким відповідає корисне навантаження на перекриття згідно з призначенням приміщень. На цьому етапі доцільно виконати налаштування матеріалів конструкцій, виключити з розрахункової схеми несучі елементи, сформувати абсолютно жорсткі тіла для несучих стін і колон та контури продавлювання для колон і пілонів, додати навантаження та завантаження, налаштувати параметри триангуляції пластинчатих елементів

Найбільш трудомістким процесом при формуванні розрахункової моделі геодезичного купола після генерації геометрії є прикладання навантажень до елементів. Дану задачу доцільно розв'язувати автоматизовано. ПК ЛІРА-САПР володіє універсальним інструментом формування файлу задачі з текстового файлу, створеного за чіткою структурою. Процес створення текстового файлу піддається алгоритмізації і може бути здійснений за допомогою середовища візуального програмування Dypamo. Dypamo виконує аналіз геометрії купола, визначення координат вузлових точок, їх округлення та забезпечує збігання елементів геометрії. Текстовий файл формується з кількох структурованих документів, що містять інформацію про ім'я файлу, ознаку системи, елементи, їх жорсткості, вузли, в'язі, навантаження та завантаження. Код транслятора геометричних даних та прикладання навантажень виконується на мові Iron Python у вигляді вкладеного скрипту в середовищі Dypamo. Застосування скрипту на Iron Python зумовлене необхідністю роботи з імперативними конструкціями (умовами, циклами), що досить трудомістко реалізується штатними засобами.

Окремої уваги заслуговує збір снігових та вітрових навантажень. Особливістю геометрії геодезичного купола є розташування пластинчатих елементів довільної площі під довільними кутами до осей координат. Спеціалізовані підпрограми алгоритму виконують розрахунок величин навантажень на окремі елементи та їх запис у відповідні документи текстового файлу.

Снігове навантаження на конструкції покриття прикладене у двох варіантах (рис. 2): рівномірному з урахуванням нахилу елементів та нерівномірному, що моделює надув снігу вітром з однієї сторони. У плані нерівномірне навантаження змінюється за синусоїдою, сягаючи максимальних значень в площині дії вітру, та нульових значень з площини.

Вітрове навантаження прикладається як рівномірно розподілене по площі окремо на кожний пластинчатий елемент. Алгоритм розраховує значення коефіцієнта висоти  $C_h$  та аеродинамічного коефіцієнта  $C_e$  в залежності відповідно від положення центра мас елемента відносно рівня землі та кута  $\beta$  між нормаллю до площини елемента і напрямом дії вітрового тиску (рис. 3). Таблиця емпіричних коефіцієнтів залежності між даним кутом та аеродинамічним коефіцієнтом  $C_e$  навантаження для зручності алгоритмізації була замінена апроксимуючим поліномом шостого порядку.

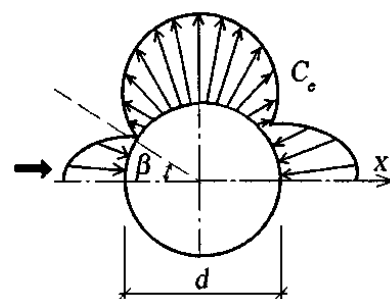
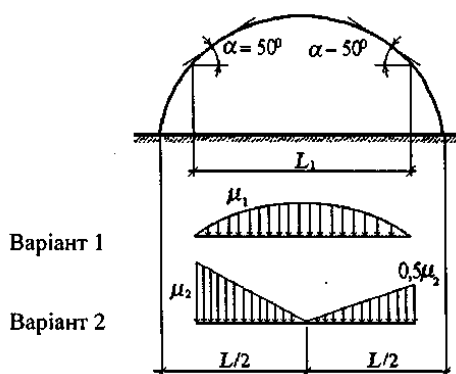


Рис. 2. Схеми збору снігового навантаження      Рис. 3. Схема збору вітрового навантаження

Після прикладання навантажень до моделі залізобетонного остову виконується експорт постаналітичної моделі у середовище ПК ЛІРА-САПР. На даному етапі виконується остаточне коригування моделі (виправлення вироджених пластинчатих елементів, видалення зайвих абсолютно жорстких тіл між несполученими конструкціями) та збирання схеми з

моделлю купола. Поєднання переміщень у шарнірних вузлах схеми виконується за допомогою скінченного елемента типу КЭ 55, призначеного для створення податливих зв'язків між елементами, встановлюючи максимально можливу жорсткість для лінійних та нульову для кутових переміщень вузлів.

Зібрана модель остову та купола розраховується в комплексі з пружною ґрунтовою основою. Одержані в результаті розрахунку карти армування елементів завантажуються в Autodesk Revit як растрова підкладка, згідно з якою виконується розташування елементів арматури. Виконується армування залізобетонних колон та коригування перерізів сталевих стрижневих елементів.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У даному дослідженні запропоновано спосіб розв'язання задачі інформаційного моделювання та міцнісного розрахунку геодезичного купола. Опрацьовано методику передачі моделей з середовища Autodesk Revit до програмного комплексу ЛІРА-САПР за допомогою штатних засобів імпорту та експорту ПК САПФІР, а також розроблено транслятор в текстовий файл задачі, виконаний у середовищі візуального програмування Dypato. Візуальне програмування зарекомендувало себе як зручний та універсальний інструмент для автоматизації моделювання. Виявлена необхідність у подальшому вдосконаленні транслятора та пошуку рішення зворотної трансляції результатів розрахунку в середовище інформаційного моделювання. Вказані питання окреслюють напрямок подальших досліджень.

## Література

1. Туполев М.С. Новые архитектурные типы сводов и куполов для массового строительства: дисс. ... д-ра архитектуры / М. С. Туполев. – М., 1951. – 214 с.
2. Fuller R.B. Geodesic dome // *Perspecta*. 1952, no. 1, pp. 30–33.
3. Павлов Г.Н. Основные концепции автоматизированного архитектурного проектирования геодезических куполов и оболочек / Г. Н. Павлов // *Изв. вузов. Сер. «Строительство»*. – 2005. – № 10. – С. 104–108.
4. Павлов Г.Н. Геодезические купола – проектирование на современном уровне / Г.Н. Павлов, А.Н. Супрун // *САПР и графика*. – М., 2006. – С. 25–27.
5. Павлов Г.Н. Автоматизация архитектурного проектирования геодезических куполов и оболочек : монография / Г.Н. Павлов, А.Н. Супрун ; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2006. – 162 с.
6. Автоматизация архитектурного проектирования и прочностного расчета геодезических оболочек / А.Н. Супрун, Г.Н. Павлов, А.Я. Лахов, А.К. Ткаченко // *Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т*. – Н. Новгород, 2008. – № 23 (7). – С. 15–19.
7. Лахов А.Я. Расчет устойчивости одноконтурных геодезических куполов системы «П» методом конечных элементов в системе Patran/Nastran / А.Я. Лахов, А.К. Ткаченко // *Информационные технологии в организации единого образовательного пространства : тр. Междунар. науч.-техн. конф.* – Н. Новгород, 2011. – С. 149–155.
8. Лахов А.Я. Транслятор геометрических моделей одноконтурных геодезических оболочек ArchiCAD – Patran // *КОГРАФ 2012. Материалы научно-технической конференции*. – Н. Новгород, 2012. – С.155–159.
9. Лахов А.Я. Приближенный способ определения максимальных напряжений в геодезических одноконтурных куполах системы «П» от воздействия собственного веса // *Приволжский научный журнал*. – 2013. – № 3. – С. 13–18.
10. Лахов А.Я. Приближенный способ определения максимальных растягивающих напряжений в стержнях двухконтурных геодезических куполов системы «Р» от воздействия собственного веса // *Вестник МГСУ*. – 2014. – № 1. – С. 58–65.

Стаття надійшла 14.05.2017