

УДК 692.445

Томашевський Андрій Володимирович

Магістрант кафедри промислового, цивільного і міського будівництва, ORCID: 0000-0001-5960-2100
ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг

Люльченко Євген Вікторович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри промислового, цивільного і міського будівництва
ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ СТРУКТУРИ ГЕОДЕЗИЧНОГО КУПОЛА НА ЕТАПІ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

***Анотація.** Однією з підказаних природою та класичною геометрією форм є геодезичний купол, що довів свою цінність в будівництві завдяки архітектурній виразності та функціональним якостям: багатоваріантності побудування й архітектурній пластичності; збереженню принципу індустріальності за рахунок використання типових елементів, виготовлених поза межами будівельного майданчика; надійності конструкції при дії статичних і динамічних навантажень. Однак конструкції на основі геодезичного розбиття ще не достатньо розповсюджені частково через недостатню автоматизованість процесу їх проектування. При наявному різноманітті варіантів проектування геодезичних куполів та оболонки перед архітектором та інженером постають питання вибору оптимального у заданих умовах варіанта. Метою параметричного проектування є швидке моделювання можливих варіантів, визначення оптимального співвідношення між архітектурною виразністю геометричної структури об'єкта й економічною доцільністю рішення на ранньому етапі проектування, вираження його у числовому вигляді та вибір оптимального варіанту конструкції для уникнення концептуальних помилок. Сіткова розбивка поверхні оболонки істотно впливає на естетичне сприйняття проектованого архітектурного об'єкта і визначає трудомісткість виготовлення деталей і вартість всієї споруди. При автоматизованому підході до параметричного проектування в середовищі інформаційного моделювання будівель можливо визначити і порівняти основні геометричні параметри варіантів конструкцій, параметри сітки розбиття та первинні техніко економічні показники.*

***Ключові слова:** Геодезичний купол; параметричне проектування; інформаційне моделювання будівель.*

Постановка проблеми

Розвиток автоматизації архітектурного-будівельного проектування є одним з найбільш пріоритетних напрямків в будівництві та архітектурі. За останнє десятиліття на допомогу проектувальникам прийшли потужні та масові програмні засоби з інформаційного моделювання будівель (BuildingInformationModelling, BIM та розрахункові комплекси з широкими можливостями для моделювання і аналізу результатів, а також підтримкою інтероперабельності з популярними середовищами інформаційного моделювання будівель. Але й штатних можливостей зазначених програмних комплексів часом буває недостатньо, тому в практиці проектування все частіше застосовуються засоби автоматизованої побудови геометрії, аналізу, роботи з базами даних.

Проектувальник використовує засоби розробника, вивчаючи архітектуру програмних комплексів (API-інтерфейс), займається написанням прикладних програм. Зручними і доступними для багатьох інженерів засобами для автоматизації проектування є середовища візуального програмування на зразок Grasshopper 3D або Autodesk Dynamo. Ці програми розширюють можливості середовищ для інформаційного моделювання будівель, дозволяють програмувати, складаючи програму з готових функціональних блоків (нодів, вузлів) та доповнюючи її строками авторського коду. Вони наочно відображають логіку програми та є простими у застосуванні, тому мають відносно низький поріг входження: інженер не повинен бути висококваліфікованим програмістом для використання середовищ візуального програмування.

Поява таких масових, простих та багатофункціональних засобів для автоматизації проектування дала поштовх до моделювання об'єктів складних форм (наприклад, геодезичних куполів) та розвитку параметричної архітектури. Це дозволяє в короткий термін та з використанням незначних обчислювальних потужностей проаналізувати безліч варіантів конструкцій на етапі концептуального проектування та уникнути принципових помилок. Описаний вище процес і складає основну змістовну частину даної роботи.

Досвід впровадження в будівництві куполів і оболонки свідчить про те, що проектування їх пов'язано з необхідністю вибору з нескінченного числа варіантів і реалізації трудомісткої та відповідальної операції розбивки конструкції на складові елементи з визначенням їх геометричних розмірів. Сітьова розбивка поверхні оболонки істотно впливає на естетичне сприйняття проєктованого архітектурного об'єкта і визначає трудомісткість виготовлення деталей і вартість всієї споруди.

Відсутність автоматизованих засобів виконання зазначеної важливої складовою архітектурного проектування, а також можливості автоматизованого моделювання об'єкта, істотно стримує застосування в будівництві геодезичних куполів і оболонки. Вказана обставина і визначає актуальність даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перші публікації щодо практичного застосування геодезичних оболонки належать професору МАРХІ М. С. Туполеву[1] і американському інженеру й винахіднику Р. Б. Фуллеру[2]. Дослідження стосувалися проблем побудови розбивок геодезичних куполів на елементи, що є найбільш математично трудомістким процесом.

Наступні розробки (Г. М. Павлов, А. М. Супрун, А. Я. Лахов та ін.) завершилися створенням системи автоматизованого побудування геометричних моделей одноконтурних і двоконтурних геодезичних оболонки на платформі Graphisoft ArchiCAD [3-6] на рівні вибору з бібліотеки видурозбивки, отримання візуального образу оболонки і документації на елементирозбивки купола.

Були розроблені транслятори для передачі моделі у програмні комплекси Ansys, Patran-Nastran для розрахунку на міцність методом скінченних елементів [7, 8]. Крім того, були проведені дослідження з розробки наближених способів

визначення напружень в елементах одноконтурних та двоконтурних геодезичних оболонки[9, 10].

Проведені дослідження чітко окреслюють загальну тенденцію: необхідність розробки максимально універсальних і простих для застосування інженером-проектувальником систем автоматизованого проектування геодезичних куполів і оболонки.

Формулювання мети статті

При наявному різноманітті варіантів проектування геодезичних куполів та оболонки перед архітектором та інженером постають питання вибору оптимального у заданих умовах варіанта. До конструкції покриття висувається ряд вимог: функціональні (відповідність форми основному призначенню будівлі), архітектурно-художні (достатня архітектурна виразність зовнішнього та внутрішнього вигляду будівлі) конструктивні (забезпечення необхідної міцності, стійкості та довговічності конструкції), експлуатаційні (відповідність конструкції нормам безпечної та нешкідливої експлуатації), технологічні (індустріальність виготовлення конструкції та зручність монтажу, обслуговування і ремонту в процесі експлуатації), економічні (економічна доцільність прийнятих конструктивних рішень у порівнянні з аналогічними або різнотипними). Розташування даних вимог за пріоритетами є власне роботою проектувальника та виконується суб'єктивно, крім того, необхідні конструктивні та експлуатаційні параметри висувають ряд неодмінних умов.

Варіації підлягає співвідношення між архітектурно-художнім (геометричним) рішенням та економічністю і технологічністю виготовлення, монтажу та експлуатації конструкції. Метою параметричної архітектури є визначення даного співвідношення на ранньому етапі проектування, вираження його у числовому вигляді та вибір оптимального варіанту конструкції для уникнення концептуальних помилок.

Основна частина

Зважаючи на геометричну складність конструкції оболонки на основі геодезичного розбиття, процес її проектування має бути максимально автоматизованим. Функціонально він складається з таких стадій: формування концептуальної геометричної моделі з наступною передачею у BIM-середовище для подальшого архітектурно-будівельного проектування; трансляція геометричної моделі у розрахунковий

комплекс, ідеалізація моделі, автоматизоване визначення граничних умов і прикладання навантажень; розрахунок на міцність методом скінченних елементів і зворотна передача результатів розрахунку в BIM-середовище.

При автоматизованому підході до проектування для оцінки оптимальності вибору геометричного рішення конструкції необхідно визначити основні геометричні параметри її форми, параметри сітки розбиття та первинні техніко-економічні показники. У даній роботі описано алгоритм для аналізу моделей сферичного покриття у вигляді геодезичного купола на основі тетраедральної, октаедральної та ікосаедральної розбивки на трикутні елементи I і II класів з частотою розбиття 12...20V, виконаний у середовищі візуального програмування AutodeskDynamo. Концептуальна геометрична модель у форматіDXFзі стрижневих та пластинчатих елементів одержана за допомогою штатних засобів ПК ЛИРА-САПР, проте вона може бути створена і в середовищі Dynamo. Архітектурно-будівельне проектування виконане у AutodeskRevit. Трансляція моделі для розрахунку в ПК ЛИРА-САПР виконується за допомогою алгоритму на Dynamo.

Розраховані основні геометричні параметри купола: радіус сфери, на основі якої виконувалося розбиття; радіус оболонки – максимальний радіус відсіченого сегменту сфери у горизонтальній площині; стріла підйому оболонки (відсіченого сегменту сфери); частина сфери; номінальний об'єм оболонки – об'єм відсіченого сегменту сфери; корисний об'єм оболонки – об'єм обмежений внутрішніми поверхнями елементів оболонки та горизонтальною площиною на рівні її основи.

До параметрів сітки розбиття відносяться: кількість стрижневих елементів; кількість типорозмірів стрижневих елементів по довжині; довжина найменшого стрижневого елемента; довжина найбільшого стрижневого елемента; загальна довжина стрижневих елементів; кількість вузлів; кількість панелей; кількість типорозмірів панелей; площа найменшої панелі; площа найбільшої панелі; загальна площа панелей.

Розраховані також первинні техніко-економічні показники: приведена до корисного об'єму загальна довжина стрижнів; приведена до корисного об'єму загальна площа панелей; показник металоемності.

Поняття показника металоемності введено для оцінки економічності проектних рішень на ранньому етапі проектування без виконання розрахунків міцності. Очевидно, що для стрижневих

конструкцій покриття з круглих сталевих труб (приймаємо використання труб єдиного діаметру для усіх елементів) визначальним при розрахунку міцності буде забезпечення стійкості найбільш стиснених елементів конструкції. Мінімальний радіус інерції перерізу з умови забезпечення стійкості елемента визначається за формулою:

$$i = \mu \frac{l_{\max}}{[\lambda]}, \quad (1)$$

де μ – коефіцієнт приведеної довжини, що залежить від форми втрати стійкості та для просторової стрижневої шарнірної конструкції дорівнює 1; l_{\max} – довжина найбільшого стисненого елемента, [λ] – гранично допустима гнучкість стрижня, що визначається нормами проектування сталевих конструкцій.

З іншого боку, з точки зору опору матеріалів для тонкостінного кільця радіус інерції наближено визначається за формулою (при $c = D / s \geq 10$):

$$i = D \frac{\sqrt{2}}{4}, \quad (2)$$

де D – приведений діаметр перерізу (середнє арифметичне між зовнішнім та внутрішнім діаметрами кільця); s – товщина стінки труби.

Одержимо

$$D = 2\sqrt{2}\mu \frac{l_{\max}}{[\lambda]}. \quad (3)$$

Загальна металоемність конструкції покриття може бути визначена як добуток сумарної довжини стрижневих елементів Σl та площі їх перерізу:

$$\Sigma l \cdot \frac{\pi D^2}{c} = \Sigma l \cdot \frac{8\pi\mu^2 l_{\max}^2}{c[\lambda]^2} = \Sigma l \cdot l_{\max}^2 \cdot \frac{8\pi\mu^2}{c[\lambda]^2}. \quad (4)$$

Позначимо величину $\Sigma l \cdot l_{\max}^2 \cdot 10^{-9}$ за показник металоемності. Його значення є певною абстракцією, проте він дозволяє наближеним методом кількісно оцінити співвідношення металоемності різних варіантів конструктивних рішень.

За допомогою середовища для візуального програмування Dynamo графічний алгоритм визначає зазначені параметри оболонок та формує порівняльну таблицю у файлі Microsoft Excel. Отримавши порівняльну таблицю для 42 варіантів геометричних рішень конструкції, оцінка оптимальності виконано шляхом оптимізації за вісьмома контрольними показниками: корисний об'єм оболонки, м³ – максимум; кількість типорозмірів стрижневих елементів – мінімум; довжина стрижневого елемента, мм – у межах 3000...6000 мм з метою забезпечення уніфікації конструкції та зменшення відходів виробництва при виготовленні зі стандартних прокатних

профілів; кількість типорозмірів панелей – мінімум; приведена до корисного об'єму загальна довжина стрижнів, м/м³ – мінімум; приведена до корисного об'єму загальна площа панелей, м²/м³ – мінімум; показник металоємності – мінімум.

За кожним з контрольних параметрів зразку, що задовольняє умові оптимізації, призначається оцінка у 100 балів, у випадку протилежного результату – 0 балів. Оцінки проміжних результатів визначаються методом лінійної інтерполяції. Таким чином, теоретична сумарна оцінка найкращого варіанта геометричного рішення конструкції складатиме 800 балів, найгіршого – 0 балів.

За результатами аналізу до складу п'ятірки лідерів входять геодезичні куполи на основі ікосаедральної розбивки I класу з частотою 13V, 14V та 15V, ікосаедральної розбивки II класу з частотою 16V, тетраедральної розбивки I класу з частотою 15V. Найгірші результати продемонстрували оболонки на основі октаедральної розбивки II класу. Слід зазначити, що варіанти конструкцій з найкращими техніко-економічними показниками є

також і найбільш привабливими з естетичної точки зору: вони мають рівномірну сітку та позбавлені вироджених елементів.

Висновки

За допомогою сукупності програмних комплексів було виконано інформаційне моделювання та розрахунок міцності сферичної конструкції покриття у вигляді геодезичного купола. Розроблено алгоритм у середовищі візуального програмування Dypаmодля визначення геометричних параметрів оболонок та аналізу оптимальності варіантів їхніх геометричних рішень. Визначено, що середовища візуального програмування у поєднанні з програмними комплексами для інформаційного моделювання будівель є потужними і універсальними засобами для формування геометрії конструкцій, роботи з даними, підтримки інтероперабельності з розрахунковими комплексами і можуть являти собою сполучну ланку в системі автоматизованого проектування геодезичних куполів і оболонок.

Література

1. Туполев М. С. Новые архитектурные типы сводов и куполов для массового строительства : дисс. ... д-ра архитектуры / М. С. Туполев. – М., 1951.
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.

Рецензент:

Томашевский Андрей Владимирович*Магистрант кафедры промышленного, гражданского и городского строительства, ORCID: 0000-0001-5960-2100
ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог***Люльченко Евгений Викторович***Кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного, гражданского и городского строительства
ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КУПОЛА НА ЭТАПЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Аннотация. Одной из подсказанных природой и классической геометрией форм является геодезический купол, доказавший свою ценность в строительстве благодаря архитектурной выразительности и функциональным качествам: многовариантности построения и архитектурной пластичности; сохранению принципа индустриальности за счет использования типовых элементов, изготовленных за пределами строительной площадки; надежности конструкции при действии статических и динамических нагрузок. Однако конструкции на основе геодезического разбиения еще недостаточно распространены частично из-за недостаточной автоматизированности процесса их проектирования. При имеющемся многообразии вариантов проектирования геодезических куполов и оболочек перед архитектором и инженером возникают вопросы выбора оптимального в заданных условиях варианта. Целью параметрического проектирования является быстрое моделирование возможных вариантов, определение оптимального соотношения между архитектурной выразительностью геометрической структуры объекта и экономической целесообразностью решения на раннем этапе проектирования, выражение его в числовом виде и выбор оптимального варианта конструкции во избежание концептуальных ошибок. Сетевая разбивка поверхности оболочки существенно влияет на эстетическое восприятие проектируемого архитектурного объекта и определяет трудоемкость изготовления деталей и стоимость всего сооружения. При автоматизированном подходе к параметрическому проектированию в среде информационного моделирования зданий можно определить и сравнить основные геометрические параметры вариантов конструкций, параметры сетки разбиения и первичные технико-экономические показатели.

Ключевые слова: *Геодезический купол; параметрическое проектирование; информационное моделирование зданий.*

Tomashevskiy Andrii*Undergraduate of industrial, civil and urban engineering department, ORCID: 0000-0001-5960-2100
SIHE "Kryvyi Rih National University", Kryvyi Rih***Lulchenko Eugene***Doctor of Philosophy, Associate Professor of industrial, civil and urban engineering department
SIHE "Kryvyi Rih National University", Kryvyi Rih*

AUTOMATION OF SEARCHING FOR THE OPTIMUM GEOMETRICAL STRUCTURE OF THE GEODESIC DOME AT THE STAGE OF CONCEPTUAL DESIGN

Abstract. *Geodesic dome is one of forms suggested by nature and classical geometry, which has proved its worth in the construction due to its architectural expression and functional qualities: multivariance of structure and building plasticity; industrialized building principle through the use of typical elements, produced outside the construction site; reliability of structure under the static and dynamic loads. However, the structures based on geodesic partition is not sufficiently widespread yet in part because of deficient automation of their design process. In the existing diversity of design options of geodesic domes and shells the problems of choosing the optimal variant under given conditions face to the architects and engineers. The purpose of parametric design is the rapid option simulation, determining the optimal balance between the architectural expression of the geometric structure and its economic feasibility at an early design stage, expressing it in numerical form and choosing the optimal design options to avoid conceptual errors. The mesh partition of shell surface significantly affects the aesthetic perception of the designed architectural object and determines the complexity of manufacturing parts and the cost of the entire building. With automated approach to parametric design in building information modeling environment it is possible to determine and compare basic geometric parameters of structure variants, mesh partition settings and primary technical and economic indicators.*

Keywords: *Geodesic dome; parametric design; building information modeling.*