

УДК 692.44

Тонкачєєв В.Г.,  
thetvg@gmail.com , ORCID ID: 0000-0002-1010-8440,  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФОРМИ І КОНСТРУКТИВНОЇ СИСТЕМИ КУПОЛЬНОГО ПОКРИТТЯ

*Розглянута проблема вибору оптимальної форми і конструктивної системи покриттів. Процес вибору форми і конструктивної системи куполів залежить від багатьох факторів. Виконано аналіз факторів функціонального призначення, естетичності форм куполів, фізики приміщень, об'ємно-планувальних параметрів споруд, конструктивно-розрахункових факторів та ін.*

*Проаналізовані критерії вибору оптимальної форми і конструктивної системи купольних покриттів. До методики включені критерії оптимальної фізики приміщення, мінімізації витрат матеріалів, оптимальної компактності будівель, мінімальної тривалості і трудомісткості зведення куполу та ін.*

*За результатами дослідження розроблена методика формування оптимальної форми і конструктивної системи купольних покриттів, використання якої значно зменшує обсяг подальших досліджень і може бути корисною для проектувальників купольних покриттів*

*Ключові слова: методика, купол, форма, фактор, критерій, пріоритет.*

**Постановка проблеми.** При виборі форми та конструктивної системи купольного покриття необхідно враховувати дуже багато факторів. На початковій стадії проектування не по всіх факторах впливу є однозначна визначність. Методики, яка б враховувала архітектурні, технологічні, техніко-економічні, конструктивні, експлуатаційні вимоги при виборі форми та конструктивної системи купольних покриттів на даний час не існує.

Пошук оптимальних параметрів куполів на ранніх етапах проектування – підвищення процесів проектування, обґрунтованість процедури прийняття правильного конструктивного рішення.

Часто при виборі конструктивних форм керуються наявністю готових рішень, простотою і мінімальною металоємністю. Багато важливих показників не беруться до уваги, що призводить до збільшення витрат на утримання будівель і споруд. А для замовника проекту, крім вартості на будівництво, не менш важлива вартість на утримання майбутньої будівлі або споруди. Тому від правильного вибору варіантів форм і конструктивних рішень залежить ефективність купола на всіх етапах життєвого циклу споруди [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблему оптимізації конструктивних рішень куполів розглянуто в роботах [1, 2]. За критерій пошуку оптимальних рішень прийнято розхід матеріалу куполу на один метр квадратний корисної площі споруди, що перекривається. Не враховуються затрати на огорожуючі конструкції та на подальшу експлуатацію споруди. При оцінюванні варіантів важлива не тільки економічність конструкцій на стадії виготовлення, транспортування і монтажу, але й ефективність на стадії експлуатації. Потрібно, ще до факторів впливу включати: простоту, зручність виготовлення елементів купола; довговічність, можливість догляду за конструкцією; відповідність конструктивного рішення купола характеру діючих навантажень [3].

Аналіз та узагальнення попередніх досліджень дозволили визначити прийнятий в даній роботі науковий напрям створення загальної методики формування оптимальної форми і конструктивної системи купольних покриттів, яка на початкових етапах проектування дає певний ефект і зменшує витрати на подальші проектні роботи.

**Формулювання цілей та завдання статті.** Мета статті – розробка нової методики формування оптимальної форми і конструктивної системи купольних покриттів, пошук оптимальних конструктивних параметрів куполів за комплексним критерієм з урахуванням подальших витрат на експлуатацію споруди.

**Основна частина.** Одними з найважливіших факторів, що формують ідею використання купольних форм покриття є фактори функціонального призначення приміщення споруди та фактори естетичності (архітектурної виразності). За результатами дослідження виявлені наступні групи факторів:

Перша група - фактори функціонального призначення ( $R_1$ ).

В роботах [1, 4] наведені приклади врахування факторів функціонального призначення при виборі і проектуванні купольних покриттів актових зал, атріумів, виставкових центрів, спортивних залів, басейнів, стадіонів тощо. Великий обсяг проектних пропозицій припадає на купольні покриття оранжерей, теплиць, споруд для зберігання різних матеріалів. В основному від цих факторів залежить вибір геометричної форми куполу, яка може бути сферичною, стрілчастою, еліптичною, параболічною, конічною і т. п. В більшості, куполи проектуються на круглому плані з прозорим покриттям.

Друга група - фактори естетичності та екологічності куполів ( $R_2$ ).

Конструкції купольних покриттів унікальні по ряду ознак і викликають інтерес у сучасних проектувальників, надаючи широкі можливості для реалізації нових архітектурних ідей з метою створення яскравого, незабутнього образу будівлі. Купольні конструкції відіграють важливу роль у формуванні

вигляду будівлі і повинні відповідати його іміджу, тому іноді архітектурні рішення визначають форму купола [4, 5]. Для даних досліджень ці фактори мають найменший вплив на конструкцію купола.

Третя група – фізичні параметри приміщень ( $R_3$ ).

Це комфортність приміщень, теплообмін, циркуляція повітря, освітленість, фокусування і розсіювання звуку. В останні часи дуже виріс попит на купольні прозорі та напівпрозорі покриття будівель і споруд. Хороші теплоізоляційні показники дозволяють знизити витрати на опалення взимку і кондиціонування повітря влітку. Хороша звукоізоляція, велика кількість світла і повітря - все це говорить на користь комфортних купольних споруд [6, 7].

Четверта група – об'ємно-планувальні параметри куполу і споруд ( $R_4$ ).

До них віднесені такі параметри: розміри споруди і покриття в плані; проліт; висота; радіус кривизни; відношення стріли підйому до прольоту купола. Форми великих, середніх та малих куполів в роботах [4, 7] класифікуються за значенням прольоту, а за відношенням стріли підйому до прольоту купола, умовно, розділяються на пологі ( $1/6...1/10$ ) та підйомні ( $1/2...1/5$ ).

П'ята група – конструктивно-розрахункові фактори ( $R_5$ ).

До них віднесені такі фактори: кількість ярусів в куполі, кількість ребер (меридіан), кількість стрижнів і вузлів в куполі, кут нахилу ребер у верхньому ярусі. Крім того розглядаються характеристика жорсткості верхнього вузла купола, навантаження і їх поєднання. З навантажень враховуються: власна маса конструкції, вага скління, вага обладнання, сніг, вітер, температурний перепад, обмерзання. Детально ці фактори досліджувалися в роботах [1, 8, 9]. Конструкції куполів приймаються сітчасті, ребристо-кільцеві, ребристі та ін.

В роботах [9, 10] стосовно конструктивно-розрахункових факторів за локальними критеріями наведені деякі рекомендації для ребристих і ребристо-кільцевих куполів по визначення підйому висоти, кроку ребер в рівні нижнього опорного кільця, кількості ярусів.

Шоста група – організаційно-технологічні рішення ( $R_6$ ).

Аналіз робіт [11] показав істотний вплив технології і організації виробництва на конструктивне рішення куполів, на конструктивне рішення вузлів з'єднання стрижневих елементів і на конструкцію самих елементів. Від прийнятих методів збирання і встановлення змінюються конструктивні рішення куполів, а від точності збірки залежить їх несуча здатність.

Сьома група – економічні умови розвитку ( $R_7$ ).

До цієї групи віднесені такі фактори, як цінова ситуація, рівень розвитку економіки країни, рівень інфляції, відсотки по кредитах та ін. [12].

Першим операційним блоком алгоритму методики є збір і аналіз інформації по запропонованим факторам, формування відповідної матриці:

$$R = (R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7) \quad (1)$$

На наступному етапі виконується призначення критеріїв ефективності. З досвіду проектування куполів та проведеного аналізу, у якості критеріїв ефективності пропонуються такі групи критеріїв.

Перша група - мінімальні експлуатаційні витрати та оптимальні фізичні параметри приміщень ( $Q_1$ ).

Це мінімальні тепловтрати, ефективний повітрообмін в приміщеннях, натуральна циркуляція повітря в приміщенні, рівномірний розподіл звуку, зменшення зовнішніх шумів [6]. Мінімальні витрати на систему опалення та водовідведення, достатня освітленість приміщень. Показником критерію вважається вартість експлуатації [1].

Друга група – мінімізація витрат матеріалів ( $Q_2$ ).

Багато дослідників вважають, що цей критерій є визначальним. Так у роботах [1, 8] детально розглянуті питомі витрати матеріалу на каркас куполу на одиницю корисної площі приміщення, що перекривається та питомі витрати матеріалу на одиницю об'єму приміщення.

Третя група критеріїв – оптимальна компактність будівель ( $Q_3$ ).

До цього критерію включено відношення площі поверхні покриття до корисної площі приміщення, що перекривається, а також відношення площі зовнішніх огорожувальних конструкцій до внутрішнього об'єму будівлі [10].

Четверта група критеріїв – мінімальна трудомісткість робіт при зведенні куполу ( $Q_4$ ).

Дослідженню трудомісткості зведення куполів присвячено роботи [11, 12]. Для зведення купольних покриттів слід враховувати витрати на необхідні спеціальні пристрої (ліси, підмостки), підйомне обладнання, стенди для укрупнення та витрати на їх експлуатацію.

П'ята група критеріїв – мінімізація вартості купола і споруди ( $Q_5$ ).

На необхідність врахування всіх витрат при визначенні вартості споруд з купольним покриттям вказували багато дослідників [1, 4]. Вартість купола і споруди повинна також враховувати вартість землі під будівлю, вартість огорожувальних конструкцій покриття і стін, вартість опалення, електропостачання та ін.

Шоста група критеріїв – надійність та живучість куполів ( $Q_6$ ).

В останні часи велику увагу дослідники приділяють проблемам надійності та живучості куполів [13], коли гарантується збереження

конструкцією здатності сприймати розрахункове навантаження при виході з ладу будь-якого елемента куполу. Надійність куполів пов'язана з довговічністю та якістю.

Сьома група критеріїв – витрати на проектні роботи ( $Q_7$ ).

Вартість проектних робіт залежить від теоретико-методичного забезпечення розрахункової і конструкторської діяльності проектувальників при виборі оптимальної форми, конструктивної системи і параметрів куполів.

Другим операційним блоком алгоритму методики є збір і аналіз інформації по критеріям, формування відповідної матриці:

$$Q_r = \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7\} \quad (2)$$

Наступні операційні блоки адаптовані з методики розстановки пріоритетів, висвітлених в роботах [14]. За системою порівняння варіантів складаються матриці суміжності факторів по критеріям. По парах порівнюються всі варіанти за принципом: краще – число «3»; однаково - число «2»; гірше - число «1». Наприклад, для критерію  $Q_2$  для факторів  $R_i$  матриця суміжності буде виглядати таким чином (таблиця 1):

Таблиця 1

Матриця суміжності факторів по критерію  $Q_2$ 

$i/j$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$B_i = \sum a_{ij}$	$P_{ir}^{ab}$	$P_{ir}^{ar}$
$R_1$	2	2	1	1	1	1	1	9	117	0,0902
$R_2$	2	2	1	1	1	1	1	9	117	0,0902
$R_3$	3	3	2	2	1	2	1	14	178	0,1372
$R_4$	3	3	2	3	1	3	1	16	207	0,1596
$R_5$	3	3	3	3	2	3	3	20	277	0,2136
$R_6$	3	3	2	1	1	2	1	13	162	0,1249
$R_7$	3	3	3	3	1	3	2	18	239	0,1843
								$\Sigma$	1297	1

На наступному етапі виконується підсумовування по рядках матриці і запис результатів в спеціальну графу (див. табл. 1) за формулою:

$$B_i = \sum_j^m a_{ij}, \quad (3)$$

де -  $a_{ij}$  чисельне значення переваги варіанту  $i$  перед варіантом  $j$  за критерієм  $r$ .

Далі визначається абсолютні пріоритети факторів один перед одним по  $r$ -му критерію (див. табл. 1) з наступним записом.

$$P_{ir}^{ab} = A \times B, \tag{4}$$

де  $A = \{R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, R_{i4}, R_{i5}, R_{i6}, R_{i7}\}$ .

Обчислювання матриці завершується визначенням нормованого (відносного) пріоритету варіантів по  $r$ -му критерію за наступною формулою із записом в наступну спеціальну графу (див. табл. 1):

$$P_{ir}^{ar} = P_{ir}^{ab} / \sum_j P_{ir}^{ab} \tag{5}$$

Аналогічно попереднім обчислюванням складаються матриці суміжності критеріїв  $Q_r$  по факторам  $R_i$ . Наприклад, по фактору  $R_2$  для критеріїв  $Q_r$  матриця суміжності буде виглядати таким чином (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця суміжності критеріїв по фактору  $R_2$

$r/j$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$B_r = \sum a_{ij}$	$G_{ri}^{ab}$	$G_{ri}^{ar}$
$Q_1$	2	1	1	1	1	1	1	8	107	0,0826
$Q_2$	3	2	1	1	1	1	1	10	125	0,0965
$Q_3$	3	3	2	1	1	1	1	12	147	0,1135
$Q_4$	3	3	3	3	1	2	2	17	225	0,1737
$Q_5$	3	3	3	3	2	3	3	20	277	0,2139
$Q_6$	3	3	3	2	1	2	3	17	223	0,1722
$Q_7$	3	3	3	2	1	1	2	15	191	0,1475
								$\Sigma$	1295	1

Визначення комплексних пріоритетів варіантів здійснюється за формулою при умові вибору ефективного (раціонального варіанту) за максимальним значенням.

$$P_{ki}^{ef} = \sum_r G_r^{ar} P_{ir}^{ar} \tag{6}$$

Комплексний пріоритет  $i$ -го фактору перед усіма альтернативними за сукупністю критеріїв є визначним для прийняття рішення. Для нашого прикладу отримані такі комплексні пріоритети (рис. 1).

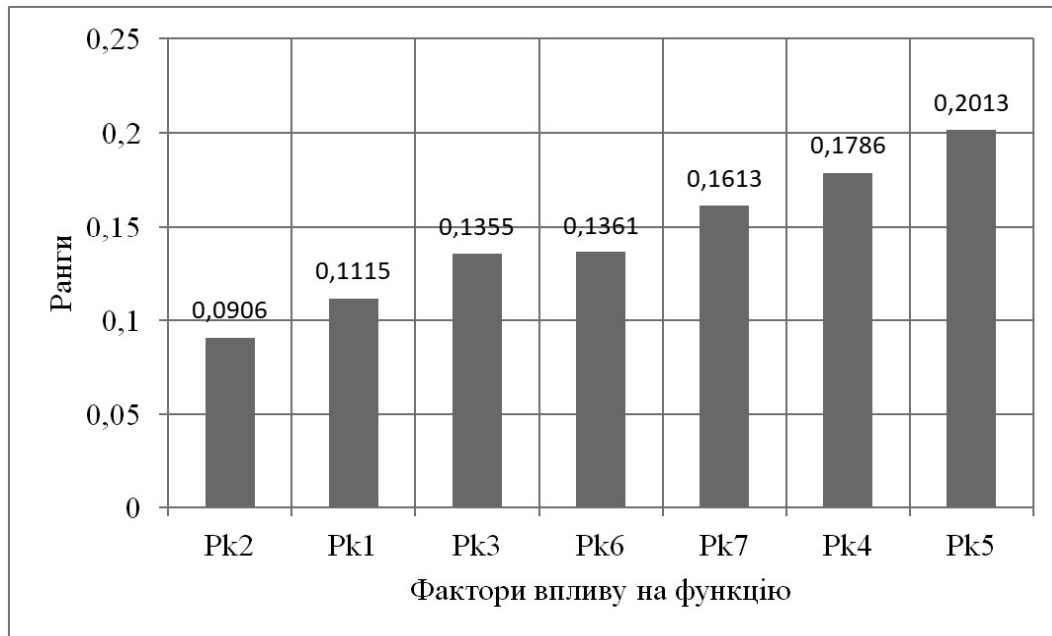


Рис. 1 Діаграма рангів факторів впливу на реалізацію функції.

За результатами розрахунків для реалізації функції “формування оптимальної форми і конструктивної системи купольного покриття” до розгляду і дослідження були прийняті такі пріоритетні фактори:  $R_5$  (група конструктивно-розрахункових факторів);  $R_4$  (об’ємно-планувальні параметри будівель і споруд);  $R_7$  (економічні умови розвитку);  $R_6$  (організаційно-технологічні рішення) та  $R_3$  (фізика приміщень). Інші фактори рекомендується при проектуванні купольного покриття не відкидати і розглядати їх у якості додаткових обмежень.

**Висновки.** Виконано дослідження факторів впливу на реалізацію функції “формування оптимальної форми і конструктивної системи купольних покриттів”, проведено аналіз критеріїв вибору.

На підставі проведених досліджень розроблена методика формування оптимальної форми і конструктивної системи купольних покриттів, використання якої значно зменшить обсяг подальших досліджень і може бути корисною для проектувальників купольних покриттів.

### Список використаної літератури.

1. Молев И.В. Стержневые звездчатые купола. Техничко-экономический анализ: учеб. пособие. - Горький, ГИСИ, 1990. - 76 с.

2. Купольные конструкции. ООО Строитель. 2012. URL: <http://www.firma-stroitel.ru/kupola.html> (Last accessed: 25.10.2016).
3. Агеева Е.Ю., Филиппова М.А. Большепролетные спортивные сооружения: архитектурные и конструктивные особенности: Учебное пособие. - Н. Новгород: Издательство Нижегородского гос. архит.– строительного университета, 2014. - 84 с.
4. Веселова Е.А., Комарова М.Л. Исследование архитектурно-конструктивных особенностей купольных покрытий зданий. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. URL: [http://www.rusnauka.com/18\\_ADEN\\_2012/Stroitelstvo/1\\_113467.doc.htm](http://www.rusnauka.com/18_ADEN_2012/Stroitelstvo/1_113467.doc.htm) (Last accessed: 06.12.2017).
5. Лебедева Н.В. Фермы, арки, тонкостенные пространственные конструкции: учеб. пособие. - М.: «Архитектура-С», 2006. - 120 с.
6. Виталий Гребнев: Преимущества купольных (сферических домов) 2013. URL: <http://athunder.livejournal.com/161078.html> March 6th, 2013 (Last accessed: 25.10.2016).
7. Свердлов В.Д. Исследование пространственных цилиндрических стержневых систем покрытия: дис...канд. техн. наук: 05.23.01 / В.Д. Свердлов. - Киев, КИСИ, 1977. - 153 с.
8. Сиянов А. И. Численные исследования металлических ребристо-кольцевых куполов // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. Вип. 2. - Київ. 2008. - С. 120.
9. Рекомендации по расчету и конструированию сетчатых куполов со стержнями из холодногнутых тонкостенных профилей / сост.: В.И. Тур, А.В. Тур, И.С. Холопов. - Ульяновск: УлГТУ, 2012. - 38 с.
10. Савельев В.А. Теоретические основы проектирования металлических куполов: автореф. дис... докт. техн. наук: 05.23.01 / Савельев Виталий Алексеевич. – Москва, 1995. - 32 с.
11. Бондарев А.Б., Югов А.М. Оценка монтажных усилий в металлическом покрытии с учетом сборки / Инженерно-строительный журнал. 2015. №4(56): - С. 28–37.
12. Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи. Металеві конструкції (Збірник 9): ДСТУ Б Д.2.2-9:2012 (чинний з 1.01.2014 р.). Київ: Мінрегіон України, 2012. - 35 с.
13. Драган, В.И. Расчет надежности металлических структурных конструкций системы / В.И. Драган, В.В. Тур, Н.Л. Морилова, А.В. Дмитриева // Вестник ПГУ. № 8: Прикладные науки. Строительство. Строительные конструкции – Полоцк: ПГУ, 2013. - С. 37–46.
14. Станочные приспособления: справ. В 2 т / В.Д. Бирюков, В.П. Близняк, В.А. Блюмберг и др.; под ред. Б.Н. Вардашкина, В.В. Данилевского. – М.: Машиностроение, 1984. Т2. 656 с.

Тонкачеев В.Г.,

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

## **МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ И КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ КУПОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Рассмотрена проблема выбора оптимальной формы и конструктивной системы покрытий. Процесс выбора формы и конструктивной системы куполов зависит от многих факторов. Выполнен анализ факторов функционального назначения, эстетичности форм куполов, физики помещений, объемно-



планировочных параметров сооружений, конструктивно-расчетных факторов и т.д.

Проанализированы критерии выбора оптимальной формы и конструктивной системы купольных покрытий. В методику включены критерии оптимальной физики помещения, минимизации затрат материалов, оптимальной компактности зданий, минимальной продолжительности и трудоемкости возведения купола и др.

По результатам исследования разработана методика формирования оптимальной формы и конструктивной системы купольных покрытий, использования которой значительно уменьшает объем последующих исследований и может быть полезной для проектировщиков купольных покрытий.

Ключевые слова: методика, купол, форма, фактор, критерий, приоритет.

V. Tonkacheiev.,  
Kyiv National University of Construction and Architecture

### **THE METHOD OF FORMING THE OPTIMAL SHAPE AND CONSTRUCTIVE SYSTEM OF DOME COVERINGS.**

The problem of choosing the optimal shape and constructive coating system was considered. The process of choosing the shape and constructive system of the domes depends on many factors. The analysis of factors of a functional purpose, aesthetics of the forms of domes, physics of premises, volume-planning parameters of construction, constructive-calculation factors, etc. was made.

The criteria for choosing the optimal shape and constructive system of dome coverings were analyzed. The methodology includes criteria for optimal room physics, minimizing the cost of materials, optimal compactness of buildings, minimum duration and laboriousness of erecting a dome, etc.

According to the results of the research, a technique for forming the optimal shape and constructive system of dome coverings has been developed, the use of which significantly reduces the amount of subsequent research and can be useful for designers of dome coverings.

Keywords: methodology, dome, form, factor, criterion, priority.