УДК 692.44

Е.И. Попова, Н.Н. Бащенко, А.И. Сорвачёв, О.Д. Чуприна

Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого

ПОВЕРХНОСТЬ КУПОЛА КАК ЭЛЕМЕНТ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Среди пространственных конструкций особое место занимают купольные конструкции или купола (рис. 1). Это одни из наиболее древних пространственных систем покрытия. Первые попытки создания криволинейных крыш – куполов – были предприняты еще в Древнем Риме [1]. Такие крыши применяли в Месопотамии, Сирии, Иране [2]. Основными используемыми для сооружения куполов материалами природного происхождения были камень и дерево. Однако пролет, покрываемый куполом, был меньше, чем сейчас, а оболочка толще. Еще совсем недавно купола в основном использовали как вариант завершения религиозной постройки [3], однако с появлением новых материалов (железобетона [4], различных пластмасс [5]) (рис. 2), а также грамотного применения давно известных материалов, таких как дерево или камень [6], купольные постройки обретают свою популярность. В двадцатом веке значительный вклад в дело строительства и применения купольных конструкций внесли Ледерер, Маковский, Отто, Райт, Бакминстер Фуллер, М.С. Туполев, М.Е. Липницкий, В.А. Савельев [2].

В настоящее время купольные конструкции используют в различном качестве: жилые дома, кафе, офисы, зимние сады, галереи, спортивные сооружения, цирки, обсерватории и даже производственные цеха. В России по большому счету купольные постройки только начинают свое распространение, однако в юго-восточной Азии [7 – 9] и в некоторых странах

Рис. 1. Купольная конструкция

Европы уже давно признаны их преимущества. Там купольные постройки достаточно распространены.

Купол – это не просто здания оригинальной формы и красивого внешнего вида, это и достаточно энергоэффективная строительная система. Эффективность этих конструкций возрастает с увеличением пролета. Не случайно большое количество покрытий площадью более 200 м^2 являются купольными. По расходу материала купольные конструкции среди пространственных жестких систем являются наиболее экономичными [2, 5]. Экономичность и энергоэффективность купольных построек объясняется уникальными геометрическими свойствами купола как строительной системы [2, 5].

Вопросы энергоэффективности достаточно остро стоят в современном мире, так как на данный момент существует проблема исчерпае-

Рис. 2. Применение современных материалов при строительстве купольных сооружений

мости имеющихся источников энергии. Однако тема энергоэффективности купольных построек как системы еще не рассматривалась ранее.

Во многих работах [1, 3, 10, 11] купол рассматривается с архитектурной точки зрения. Приводятся примеры зданий и памятников архитектуры, где используются купол и сводчатые конструкции, а также рассказывается об истории купольных построек.

Свойства купольных конструкций изучаются в работах [5, 12], здесь же рассмотрены некоторые вопросы их экономической эффективности.

О свойствах куполов, изготовленных из различных материалов, рассказывается в работах [13, 4]. Авторы поясняют, как свойства используемого для изготовления куполов материала влияют на свойства самих куполов.

Авторы работы [14] приводят пример применения системы автоматизированного проектирования путем использования библиотечных элементов, что значительно облегчает проектирование объектов, в том числе и достаточно сложных – купольных.

В работе [15] задана цель: решить задачи формообразования купольных покрытий вертикального цилиндрического резервуара и экспериментально определить ветровые и снеговые нагрузки на крышу. В ходе исследования было предложено несколько нетрадиционных геометрических форм покрытий цилиндрических резервуаров, определены характер распределения и величина снеговой нагрузки на покрытиях предложенных форм.

Важной задачей является рассмотрение основных разновидностей сводчатых конструкций зданий, анализ истории их исследования и текущей степени их изученности. До настоящего времени не найден закон распределения напряжений в теле свода и не разработаны критерии прочности и устойчивости, о чем говорят авторы работ [1, 3] в ходе аналитического обзора.

Исследователь В. Тур в работе [2] рассказывает о принципах формообразования купольных сооружений, рассматривает различные конструктивные решения, узловые соединения элементов, проводит расчет куполов, рассматривает вопросы повышения эффективности купольных конструкций [2].

При проектировании любого сооружения, особенно купольной конструкции, энергоэффективность и экологичность являются важными параметрами. В работах [6, 9, 12, 16 – 18] изучаются преимущества и возможности строительства купольных сооружений – сфер в современных условиях, рассматриваются проблемы срока службы таких зданий, обсуждаются вопросы выбросов CO_2 и их сокращения, проблемы технологий «зеленого» строительства, делаются выводы об энергоэффективности и экологичности купольных сооружений и их строительства.

Энергоэффективность купола обусловлена его формой. Благодаря геометрии сферы свойства некоторых видов энергии в купольном сооружении оптимальны для экономии [5, 10, 13]. Проведем сравнение купольной постройки и здания прямоугольной формы по некоторым их геометрическим параметрам: жилая (или полезная) площадь здания, высота здания, площадь боковой поверхности, объем. Для корректности сравнивать будем здания с приблизительно одинаковой полезной площадью.

Ниже приведены сравнительные расчеты геометрических характеристик купольного здания с покрываемой площадью круга радиусом R = 6 м и постройки прямоугольной формы с покрываемой площадью прямоугольника размерами a = 8 м и b = 14 м.

Под кровельной поверхностью понимается площадь поверхности здания, которая покрывается впоследствии кровельными материалами или является кровлей. Для купола принято, что 1/3 всей площади поверхности купола является кровельной, а для прямоугольного дома – площадь верхней грани параллелепипеда с параметрами 8×14×4 м как минимальная площадь поверхности кровли.

Под стеновой боковой поверхностью понимается площадь боковой поверхности здания, которая впоследствии покрывается стеновыми материалами или является стенами. Для купола это 2/3 всей площади поверхности, а для прямоугольного дома – сумма площадей боковых граней параллелепипеда с параметрами 8×14×4 м.

Используемые формулы:

1) для купольной конструкции:

а) жилая площадь здания: $S_{ж.к} = \pi R^2$;

б) площадь боковой поверхности для полусферы: $S_{б.к} = \dfrac{4\pi R^2}{2}$;

в) площадь кровельной поверхности: $S_{к.к} = \dfrac{S_{б.к}}{3}$;

г) площадь стеновой поверхности: $S_{с.к} = \dfrac{2S_{б.к}}{3}$;

2) для прямоугольного здания:

а) жилая площадь здания: $S_{ж.п} = a \times b$;

б) площадь боковой поверхности: $S_{б.п} = a \times b + a \times h \times 2 + b \times h \times 2$;

в) площадь кровельной поверхности: $S_{к.п} = a \times b$;

г) площадь стеновой поверхности: $S_{с.п} = a \times h \times 2 + b \times h \times 2$;

3) расчет экономии:

а) для кровельных материалов: $\frac{S_{к.п} - S_{к.к}}{S_{к.п}} 100\ \%$;

б) для стеновых материалов: $\frac{S_{с.п} - S_{с.к}}{S_{с.п}} 100\ \%$.

Высота купольного здания принимается равной его радиусу, а высота здания прямоугольной формы – из расчета, что его объем примерно равен объему купольного здания, то есть полусферы. Поэтому высота прямоугольного здания для расчета сравнительных характеристик определяется по формуле $h = \frac{V_{сферы}}{2} / S_{ж}$.

Как видно из приведенных расчетов (см. таблицу), при одинаковых покрываемой площади и объеме имеет место значительная разница в площади поверхности зданий различных конструкций. Таким образом, одним из преимуществ купольных построек является их энергоэффективность – уменьшение теплопотерь за счет меньшей площади поверхности. Форма купола является в этом смысле самым выгодным вариантом.

Изготавливаются купола практически бесшовными, а значит, и потери тепла через швы тоже будут минимальными по сравнению со зданиями других геометрических форм [14].

Если рассматривать аэродинамические свойства, то купола создают наименьшее сопротивление ветру. Следствием этого является отсутствие сквозняков и выветривания тепла [3, 15]. Если через поверхность уходит меньше тепла за счет того, что сама эта площадь меньше, то и меньше тепла будет попадать в сооружение извне: зимой в купольном доме будет тепло, а жарким летом – прохладно. Таким образом, можно значительно экономить на затратах на дополнительный обогрев или охлаждение здания (рис. 3).

За счет естественной кривизны купола происходит естественная циркуляция воздуха: теплый воздух от пола поднимается вверх, холодный – опускается вниз. Так происходит естественный воздухообмен в купольном здании [1]. В зданиях такой конструкции нет углов – областей, где обычно застаивается воздух. Таким образом, снижаются затраты на кондиционирование воздуха.

Рис. 3. Схема воздухообмена в купольном сооружении

Сравнение геометрических характеристик купольного здания и здания прямоугольной формы

Сравнительная характеристика	Значение показателя		Выводы
	для купольного здания	для здания прямоугольной формы	
Размеры, м	6 (радиус)	8 × 14	
Жилая площадь здания, м^2	113,04	112,00	Площадь одинакова
Высота здания, м	6	4	
Площадь боковой поверхности, м^2:			
полная	226,10	288	На 22 % меньше общая площадь поверхности купольного здания
кровельная	75,40	112,00	На 33 % меньше площадь кровли купольного здания
стеновая	150,74	176,14	На 14 % меньше площадь боковой поверхности купольного здания
Объем, м^3	452,16	448,00	Объем одинаков

Звук внутри купола распределяется равномернее, чем в прямоугольных зданиях [2]. Также, благодаря меньшей площади поверхности, меньше звуков проникает внутрь сооружения извне, а те звуки, которые все-таки проникают в здание, частично поглощаются из-за многократного отражения. Прекрасные акустические свойства купола снижают затраты на звукоизоляцию.

Многократно отражаясь от стен правильной сферической формы, свет внутри купола рассеивается, становится «мягким», тогда как свет внутри прямоугольных построек абсорбируется, то есть поглощается [12]. Это может подтвердить простой опыт: замена абажура в виде прямоугольного параллелепипеда на полусферический абажур сделает любую комнату светлее. То есть купол позволяет экономить и на искусственном освещении.

Энергоэффективность купольных конструкций можно увеличить, сделав купольные постройки одними из самых энергоэффективных сооружений. Улучшить естественные показатели энергоэффективности куполов можно путем внесения некоторых изменений в конструкцию самого купола.

К примеру, герметичное отверстие на вершине купола или слуховые окна, которые иногда можно открывать, способствуют улучшению циркуляции воздуха и улучшению вентиляции внутри сооружения [19]. Использование теплоизоляционных материалов или большой воздушный зазор в самой конструкции купола могут уменьшить потери тепла или же, наоборот, проникновение теплого воздуха извне, в зависимости от времени года.

Грамотное размещение окон и стеклопакетов увеличивают поток естественного света, попадающего внутрь здания (рис. 4), а также уменьшают теплопотери. Одним из вариантов также является сооружение прозрачного герметичного отверстия на вершине купола [2] (рис. 5).

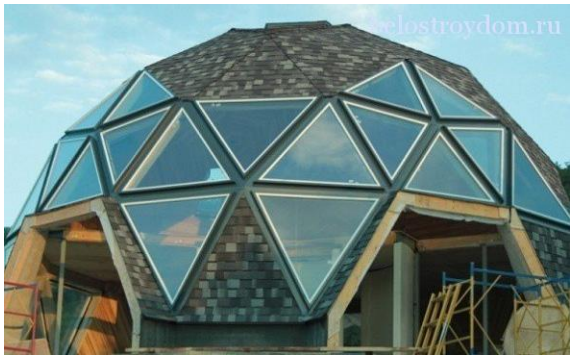

Рис. 4. Пример размещения окон при строительстве купольного здания

Размещение на внешней поверхности купола различных приборов для сбора природной энергии солнца, ветра и воды (солнечных батарей, ветряных генераторов, небольших резервуаров для сбора воды и т.д.) (рис. 6), а также использование в строительстве природных экологичных материалов и установка различных средств по утилизации отходов жизнедеятельности могут сделать купольные сооружения одним из вариантов загородных объектов «зеленого» строительства.

Таким образом, при рассмотрении различных свойств куполов можно сделать вывод, что энергоэффективность такой постройки обусловлена, в первую очередь, меньшей по сравнению со зданием прямоугольной формы площадью поверхности. Соответственно, существует целый ряд факторов, за счет которых возможна экономия энергии: меньшие потери тепла, естественный воздухообмен, хорошая звукоизоляция, меньшее поглощение естественного света, лучшее распространение искусственного света.

Авторами рассмотрено и предложено несколько способов изменений конструкции купола, которые помогут сделать его еще более энергоэффективным, не утратив при этом своих первоначальных преимуществ по сравнению с постройками прямоугольной формы. Это отверстие на вершине купола, использование теплоизоляции или создание воздушного зазора, грамотное размещение окон, установка современных приборов для сбора энергии. На основании проделанной работы авторы делают вывод, что купол – это конструкция, имеющая огромный потенциал в сфере «зеленого» строительства. Купольная постройка будет рациональным объектом малоэтажного строительства в любом климате как с экономической точки зрения, так и с точки зрения энергетической эффективности.

Рис. 5. Прозрачный герметичный купол

Рис. 6. Размещение приборов для сбора природной энергии солнца и ветра

Во всем мире существует множество великолепных купольных сооружений и легион их поклонников. В настоящее время возможности применения новых конструкционных материалов, новые возможности выполнения сложных расчетов породило новую волну интереса к купольным конструкциям. Множество людей начинает заново открывать для себя эти жизнеутверждающие, конструктивно безопасные, экологически продуманные формы жилищ.

Выводы. При одинаковых покрываемых объеме и площади помещения площадь поверхности купола значительно меньше площади стен и крыши прямоугольного здания. На основе проведенного сравнения сделаны выводы об энергоэффективных свойствах купольных покрытий за счет меньшей площади оболочки. На основании анализа геометрических свойств куполов отмечены параметры, за счет которых купольная форма является более энергоэффективной. В работе предложено несколько способов увеличения энергоэффективности таких построек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рябухина С.А. Каменные сводчатые конструкции: история, классификация, применение // СУЗИС. 2015. № 6 (33). С. 87 – 97.
2. Тур В.И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности. – М.: АСВ, 2004. – 96 с.
3. Зимин С.С., Беспалов В.В., Кокоткова О.Д. Сводчатые конструкции исторических зданий // СУЗИС. 2015. № 2 (29). С. 57 – 72.
4. Sylwester Kobielak, Zenon Zamiar. Oval concrete domes // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 17. Issue 3. P. 486 – 501.
5. Фри Роберт М. Геодезические купола как наиболее эффективные строительные системы // Строительство и недвижимость [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nestor.minsk.by/sn/1997/31/sn3109.htm. (Дата обращения 10.05.2017 г.).
6. Gene-Harn Lim, Michael Barry Hirning, Nila Keumala, Norafida Ab. Ghafar. Daylight performance and users' visual appraisal for green building offices in Malaysia // Energy and Buildings. 2017. Vol. 141. P. 175 – 185.
7. Qingbin Song, Jinhui Li, Huabo Duan, Danfeng Yu, Zhishi Wang. Towards to sustainable energy-efficient city: A case study of Macau // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 75. P. 504 – 514.
8. Yishi Liu. Building Guastavino dome in China: A historical survey of the dome of the Auditorium at Tsinghua University // Frontiers of Architectural Research. 2014. Vol. 3. Issue 2. P. 121 – 140.
9. Vivian W.Y. Tam, Sepani Senaratne, Khoa N. Le, Li-Yin Shen, Josip Perica, I.M. Chethana S. Illankoon. Life-cycle cost analysis of green-building implementation using timber applications // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 147. P. 458 – 469.
10. Кузяева Н.А., Горбунова В.С. Купольные конструкции как способ реализации новых архитектурных идей // Perspectives of Science and Education. 2014. No. 1(7). P. 269 – 272.
11. Широков В.С., Алпатов В.Ю. Разработка алгоритма и программного инструмента для упрощенного задания геометрии дискретного сферического купольного покрытия при его параметрической оптимизации с применением программных комплексов «Лира» и SCAD // Научный электронный архив. – Режим доступа: http://www.econf.rae.ru/article/7098. (Дата обращения 10.05.2017 г.).
12. Прелов С.А. Строительство быстровозводимых жилых и социальных объектов в рамках концепции «Архитектура ноосферы» под брендом «ЛотосДом». – В кн.: Материалы II Всероссийской научной конференции с международным участием «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий». 24-26 марта 2015 г. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2015. С. 42 – 49.
13. Айрапетов Д.П., Заварихин С.П., Макотинский М.П. Пластмассы в архитектуре. – М.: Стройиздат, 1981. – 190 с.
14. Павлов Г., Супрун А.Н. Геодезические купола: проектирование на современном уровне // САПР и графика. 2006. № 3.

15. Порываев И.А., Сафиуллин М.Н., Семенов А.А. Исследование ветровой и снеговой нагрузок на покрытия вертикальных цилиндрических резервуаров // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 5. С. 12 – 22.

16. Dale E. Yeatts, Dana Auden, Christy Cooksey, Chien-Fei Chen. A systematic review of strategies for overcoming the barriers to energy-efficient technologies in buildings // Energy Research and Social Science. 2017. In press.

17. Amin Haghighi Poshtiri, Safoura Bahar, Azadeh Jafari. Daily cooling of one-story buildings using domed roof and solar adsorption cooling system // Applied Energy. 2016. Vol. 182. P. 299 – 319.

18. Rakhyun Kim, Sungho Tae, Seungjun Roh. Development of low carbon durability design for green apartment buildings in South Korea // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 77. P. 263 – 272.

19. Zhonghua Gou, Xiaohuan Xie. Evolving green building: triple bottom line or regenerative design? // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 153. P. 600 – 607.

20. Amos Darko, Albert Ping Chuen Chan, Ernest Effah Ameyaw, Bao-Jie He, Ayokunle Olubunmi Olanipekun. Examining issues influencing green building technologies adoption: The United States green building experts' perspectives // Energy and Buildings. 2017. Vol. 144. P. 320 – 332.

© 2017 г. Попова Е.И., Бащенко Н.Н., Сорвачев А.И., Чуприна О.Д.

Поступила 23 мая 2017 г.