

**П.С. Шанько, А.В. Шишкина, С.В. Калошина**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

## **Методы строительства и преимущества купольных зданий**

В статье содержится информация об истории возникновения и зарождения самой идеи купольного строительства. Рассматривается целесообразность строительства купольных зданий и сооружений различных назначений. Поднимается вопрос о прочностных, экономических, экологических, эстетических и других достоинствах и незначительных ограничениях купольного строительства. Наглядно произведен расчет объемов и площадей поверхностей купольного здания и здания в форме параллелепипеда для доказательства большей энергетической эффективности купольного дома по показателю компактности здания. Приведены некоторые характеристики дома-купола в сравнении с обычным зданием кубического типа. Характеристики сопоставлены между собой и сведены в таблицу для оценки и сравнения наиболее значимых параметров при строительстве и эксплуатации. Кроме того, в статье описаны следующие технологии возведения купольных зданий: купольное строительство на основе геодезической сферы, возведение зданий на основе пневмокаркаса, методы строительства купольного дома на основе несъемной опалубки и зданий фабричного производства.

**Ключевые слова:** купол, купольный дом, сфера, геодезический купол, купольное здание, дом-купол, экодом.

**P.S. Shanko, A.V. Shishkina, S.V. Kaloshina.**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **Construction methods and advantages of dome buildings**

This article contains information about the history and origin of the idea of the construction of the dome. Consider the feasibility of building domed buildings of any purpose. It raises questions about the strength, economic, environmental, and aesthetic and other advantages and disadvantages of small domed structure. Visually calculated the volume and surface area of the dome of the building and the building in the shape of the box, in order to prove greater energy efficiency geodoma, in terms of compactness of the building. Some characteristics of the dome - house in comparison with a conventional building of the cubic type. Characteristics are compared with each other and are summarized in the table for the evaluation and comparison of the most important parameters in the construction. Also in the article describes the following technology of erection of buildings dome: the dome construction on the basis of a geodesic sphere, the construction of buildings on the basis pneumoframework, methods of building dome homes on the basis of permanent formwork and building factory production.

**Keywords:** Cupola dome house, Sphere, geodesic dome, domed building, house dome, eco-house.

### **Введение**

В современном строительстве все больше внимания уделяется креативным решениям, воздействие которых на окружающую среду минимально. Целью таких домов является снижение уровня потребления материальных и энергетических ресурсов в процессе возведения здания и его последующей эксплуатации. Оно достигается за счет использования экологически чистых материалов, применения новых технологий и подходов. Одной из последних тенденций строительства являются цельно-купольные здания. Здания, в которых купол становится не только покрытием, но и внешним каркасом. Наибольшее распространение среди них имеют металлические сетчатые купола, как разновидность сетчатых оболочек. Так называемый геодезический купол.

### **Основная часть**

Создателем геодезического купола является американский архитектор, дизайнер, инженер и изобретатель – Ричард Бакминстер Фуллер. Он разрабатывал пространственную конструкцию геодезического купола с 1947 года. Геокупол принес ему международное признание. В 1959 году для Американской национальной выставки в Москве был построен «золотой купол» (рис.1), в 1967 году – павильон США на Всемирной выставке в Монреале (рис.2) [1]. На сегодняшний день популярность геодезических куполов только набирает обороты. Их начали широко использовать в строительстве жилых домов, используя при этом множество разнообразных материалов. Таким образом, именно геодезический купол дал старт цельнокупольному строительству в целом.



Рис. 1. «Золотой купол» на Американской национальной выставке в г. Москва, 1959г



Рис. 2. Павильон США на Всемирной выставке в Монреале, 1967г

Существует несколько методов возведения купольных строений: купольное строительство на основе геодезической сферы; возведение зданий на основе пневмокаркаса; метод строительства купольного дома на основе несъемной опалубки; технология возведения дома-купола, представляющего собой сборную конструкцию фабричного производства. Последовательно рассмотрим каждый из них.

Метод геодезической сферы основан на применении каркаса в виде триангулярной полусферы. Технология заключается в использовании «икосайдеров» – равных треугольных конструкций, как правило, деревянных, вершины которых устремляются к центру по мере увеличения высоты здания, в результате чего образуется целостный каркас (рис.3) [2]. Особенность технологии заключается в использовании экоматериалов [3].



Рис. 3. Процесс возведения каркаса купольного здания на основе метода геодезической сферы

Технология возведения зданий на основе пневмокаркаса считается относительно новой. Она была сформирована благодаря эволюции производства полимерных материалов. Несмотря на то что технология этого метода является наиболее трудоемкой и непривычной, временные затраты на строительство сводятся к минимуму. Этапы строительства включают в себя возведение фундамента ленточного или в виде монолитной плиты с выводением по периметру вертикальных элементов, а именно

профильной арматуры [4]. Затем производится сооружение каркаса в виде армирующей сетки посредством сварки стальных стержней с элементами арматуры. По мере наращивания конструкции стержням придают форму купола, после чего путем сварки включают в конструкцию поперечные стержни. Главным же элементом технологии служит пневмокаркас, который в надутом виде повторяет контуры полусферы. Когда пневмокаркас надувается, осуществляют разметку размеров будущих проемов на армирующей сетке. После чего каркас на время сдувается для того чтобы вырезать арматуру под проемы, которые затем окантовываются профильной арматурой. Когда работы над проемами завершены пневмокаркас обрабатывают гидрофобным составом, устанавливают на место и надувают (рис.4).



Рис. 4. Элемент пневмокаркаса

Завершающий этап – нанесение на купол основного материала (рис.5), в качестве которого могут быть использованы пенополистирол, торкретбетон, цементно-полимерный бетон.



Рис. 5. Нанесение основного материала на купол

Метод строительства купольного дома на основе несъемной опалубки это один из наименее трудоемких из известных сегодня методов возведения дома-купола. Это обусловлено минимальными временными затратами. Технология, основанная на использовании полистирольной опалубки и блоков, дает возможность возводить здания в течение двух недель, если не брать во внимание сооружение фундамента и внутреннюю отделку. Преимуществом данного метода является то, что все части здания изготавливаются на предприятиях. Затем материалы транспортируются на место строительства, где их впоследствии собирают в единую конструкцию (рис.6). Как правило, в качестве исходного материала принято использовать пенополистирол. Дома возведенные на основе метода несъемной опалубки считаются энергоэффективными, это можно объяснить их конструкцией. Она основана на использовании большого количества теплоизоляционных материалов. На фасад дома наносится водостойкая штукатурка. Для строительства дома-сферы используют армирующий каркас. На него крепят многослойный блок. После возведения купола, монтируются двери и окна, обрабатываются стыковые швы и производится внешняя и внутренняя отделка построенного купола.



Рис. 6. Процесс устройства купольной конструкции на основе метода несъемной опалубки.

Технология строительства дома-купола, представляющего собой сборную конструкцию фабричного производства, имеет много общего с предыдущим методом. Она тоже производится на промышленных предприятиях. Скорость возведения здания также высока. Здание, построенное по данной технологии, довольно часто, используют сезонно. Это объясняет их широкое применение. Кроме того, блочные дома не нуждаются в проведении дополнительного бетонирования и транспортируются сразу полным комплектом включая окна, двери и даже вентиляционные системы. В первую очередь из блоков монтируют цокольный уровень путем крепления его к основанию при помощи анкеров. Затем возводят купол в процессе скрепления одинаковых блоков. После возведения стен устанавливаются окна и двери. Благодаря заводским пазам и механическим соединениям принцип их монтажа довольно прост. Внешний слой блоков в домах имеет специальное покрытие, поэтому выполнять их фасадную отделку можно быстро и легко.

Можно назвать немало причин, взяв во внимание которые, следовало бы отдать предпочтение купольному строительству:

1. Прочность. Прочность обусловлена равномерным распределением нагрузок по всему куполу, что гарантирует отсутствие опасных зон внутри строения. Для купольных зданий, построенных по принципу геодезической сферы, прочность обеспечивается также сетью геодезических линий [5].

2. Низкие теплопотери. Энергетическая эффективность определяется посредством расчета показателя компактности здания, который вычисляется как отношение общей площади внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций здания к заключенному в них отапливаемому объему и нормируется в СП 50.13330.2012[3]. Чем меньше данная величина, а значит, чем компактней форма, тем меньше тепла будет потеряно. В сравнении со всеми фигурами одинакового объема сфера имеет наименьшее отношение площади наружных стен к внутреннему объёму здания. В качестве доказательства произведем следующие расчеты [6]. Если сравнивать два дома, форма одного из которых – полусфера с радиусом 4метра(рис.7а), а другого – параллелепипед с длиной 10 метров, шириной 5 метров и высотой 2,6 метров (рис.7б), то

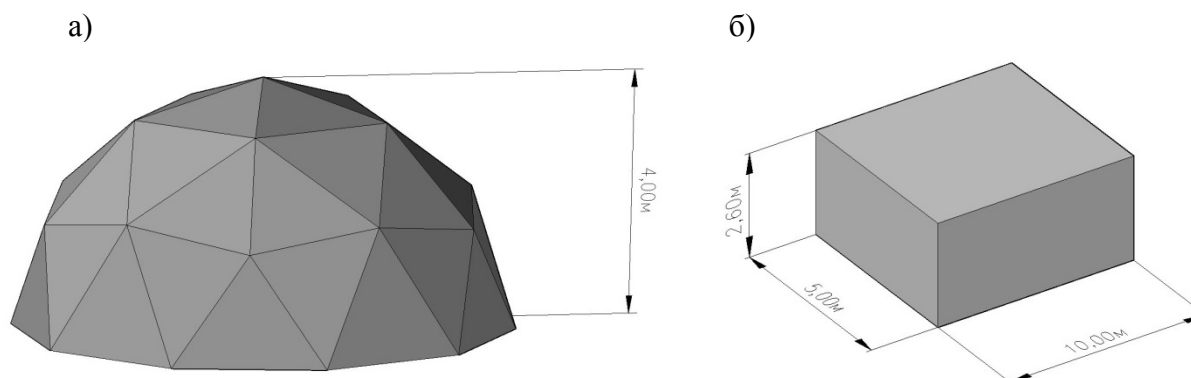


Рис. 7. а) Дом в виде полусферы; б) Дом в виде параллелепипеда

объем полусферы составляет:

$$V_{\text{сфер}} = \frac{4\pi R^3}{6} = \frac{4\pi 4^3}{6} = 134\text{м}^3 \quad (1)$$

где  $V_{\text{сфер}}$  – объем сферы,  $\text{м}^3$ ;  $R$  – радиус сферы, м.

Объем параллелепипеда составляет:

$$V_{\text{пар}} = S_{\text{осн}} h = 50 * 2,6 = 130\text{м}^3 \quad (2)$$

где  $V_{\text{пар}}$  – объем параллелепипеда,  $\text{м}^3$ ;  $S_{\text{осн}}$  - площадь основания параллелепипеда,  $\text{м}^2$ ;

$$S_{\text{осн}} = a * b = 5 * 10 = 50\text{м}^2 \quad (3)$$

где  $a$  – ширина основания параллелепипеда, м;  $b$  – длина основания параллелепипеда, м.

$h$  – высота параллелепипеда, м.

Следовательно, при почти равных объемах площадь поверхности параллелепипеда составляет:

$$S_{\text{пов.парал}} = 2(ab + bc + ac) = 2(10 * 5 + 5 * 2,6 + 10 * 2,6) = 178\text{м}^2 \quad (4)$$

где  $a$  – длина основания параллелепипеда, м;  $b$  – ширина основания параллелепипеда, м;  
 $c$  – высота параллелепипеда, м.

а площадь поверхности сферы

$$S_{\text{пов.полусф}} = \frac{4\pi R^2}{2} = \frac{4\pi 4^2}{2} = 100,48\text{м}^2 \quad (5)$$

Таким образом, купольный дом является более компактным и потеряет тепла меньше как минимум на 20%.

3.Малый расход материалов. При условии равенства объемов сферы и параллелепипеда площадь поверхность сферы много меньше площади поверхности параллелепипеда, это видно из произведенных выше расчетов, а значит и материалов для строительства купола понадобится до 40-50% меньше [7]. Кроме того, легкая конструкция купольного дома не требует устройства массивного фундамента.

4.Скорость строительства. Возведение готового к эксплуатации дома-купола составляет от одного до четырех месяцев. Время строительства зависит от диаметра купола. Строительные работы не требуют сложных подъемных механизмов и большого числа рабочих, что позволяет значительно снизить финансовые затраты на возведение.

5.Естественное освещение. Конструкция дома-купола позволяет устанавливать многочисленные оконные проемы в любой точке поверхности полусферы, не снижая при этом прочностных характеристик. Также сферические формы усиливают свет, в отличие от прямоугольных, которые его поглощают [8].

6.Климато- и сейсмоустойчивость. Благодаря тому, что купол обладает аэродинамической формой, ветер огибает купол, вместо того, чтобы ударять в вертикальную стену, создавая тем самым область высокого давления[9], кроме того, благодаря не только форме, но и своей прочности купол выдерживает большие снеговые нагрузки. Что касается сейсмоустойчивости, в случае землетрясения, разрушение 35-40% элементов дома-купола не приводит к обрушению здания.

7.Аэрация воздуха внутри дома. Форма купола обеспечивает постоянную



циркуляцию воздуха, что обеспечивает хорошую естественную вентиляцию помещений, исключая застои воздуха [10].

8. Уникальный внешний вид. Дом выглядит непривычно, оригинально, что безусловно подчеркнет индивидуальность заказчика. Купольная форма позволяет использовать нестандартные решения в интерьере.

Ограничения купольного дома в сравнении с его преимуществами можно считать незначительными. Их причины никак не связаны с конструкцией, экономичностью и надежностью строения. Отрицательные моменты в строительстве и эксплуатации дома-купола напрямую связаны с заказчиком:

- Недостаточная осведомленность о купольном строительстве
- Привычка человека жить в помещении прямоугольной формы, боязнь стать владельцем чего-то уникального, что, возможно, будет вызывать недоумение у окружающих
- Малоэтажность. Чем выше здание, тем больше диаметр основания, что весьма проблематично в условиях современной жилищной застройки
- Привычка жить в многоквартирном доме, а не в частном

Рассмотренные характеристики сведены в таблицу (табл.1).

Сравнение дома-сферы и дома-параллелепипеда

Таблица 1.

Рассматриваемый параметр	Дом-сфера	Дом-параллелепипед
Наличие опасных зон, зависящих от равномерности распределения нагрузок	-	+
Объем, м <sup>3</sup>	134	130
Площадь поверхности фигуры, м <sup>2</sup>	100,48	178
Массивный фундамент	-	+
Скорость строительства, мес	1-4	более 6
Сложные подъемные механизмы	-	+
Сейсмоустойчивость	разрушение 35-40% элементов дома-купола не приводит к обрушению здания	Разрушение 20% элементов дома-параллелепипеда приведет к разрушению здания
Наличие застоев воздуха	-	+

#### Заключение

В ходе выполненного анализа были сделаны следующие выводы. Купольные дома возводятся по четырем основным технологиям, а именно купольное строительство на основе геодезической сферы; возведение зданий на основе пневмокаркаса; метод строительства купольного дома на основе несъемной опалубки; технология возведения дома-купола, представляющего собой сборную конструкцию фабричного производства. Дом-сфера превосходит привычный дом в форме параллелепипеда практически по всем рассмотренным параметрам. Купол прочнее параллелепипеда. Также он характеризуется низкими теплопотерями так как сфера более компактна и потеряет тепла, как минимум, на

20% меньше. Конструкция купола очень проста, она позволяет экономить на материалах до 40-50% в сравнении с домом-параллелепипедом. Время возведения готового к эксплуатации дома-купола составляет от одного до четырех месяцев, что значительно превышает время на возведение дома-параллелепипеда. Ограничений в строительстве немного, они носят психологический и информационный характер, поэтому считать их весомыми нельзя. В условиях современного строительства активно развиваются новые технологии направленные на воплощение в жизнь креативных идей, способных снизить затраты на строительство, быть эстетичными и экологичными. Одним из таких решений являются - купольные здания и сооружения. На сегодняшний день их широко используют как в строительстве частных домов, так и общественных.

### **Библиографический список**

1. Кузнецова Н.А., Горбунова В.С. Купольные конструкции как способ реализации новых архитектурных идей // Перспективы науки и образования. - 2014. - №1. - С.269-272.
2. Apfeldorf Michael, From Dome Homes to Fullness // The Science Teacher. – 2016.- №1.
3. Тетюр А.Н. Архитектурно-строительная экология. - М.: Академия, 2008. -368 с.
4. Monolithic Dome Homes [Электронный ресурс] – URL: <http://www.monolithic.org/homes>
- 5.Алексеев Ю.В., В.П. Казачинский, В.В. Бондарь «История Архитектуры, градостроительства и дизайна». Курс лекций. - М. Издательство АСВ, 2004, - 448с.
6. Сычев С.А. Эко технологии строительства с учетом критериев энергоэффективности зданий // Science Time. - 2014. -№10. - С.343-349.
7. Бадугин Г.М. Строительство и реконструкция малоэтажного энергоэффективного дома. - СПб.: БХВ-Петербург, 2011. - 432 с.
8. Андерсон Б. Солнечная энергия: (Основы строительного проектирования). -М.: Стройиздат, 1982. - 375с.
9. Сычев С.А. Энергоэффективный подход к возведению высотных зданий // актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. - 2014. - №10. - 4 с.
10. Есипова А.А. Применение геодезических куполов в строительстве: преимущество и недостатки // Наука и современность. - 2015. - №38. - С.8-11.

### **References**

- 1.Kuznjaeva N.A., Gorbunova V.S. Kupol'nye konstrukcii kak sposob realizacii novyh arhitekturnyh idej. [Dome structure as a way of realization of new architectural ideas] // Perspektivy nauki i obrazovanija. - 2014. - №1. - S.269-272.
2. Apfeldorf Michael, From Dome Homes to Fullness // The Science Teacher. – 2016.- №1.
3. Tetior A.N. Arhitekturno-stroitel'naja jekologija. [Architectural and construction ecology.] - M .: Akademija, 2008. -368 s.
- 4.Monolithic Dome Homes [Electronic resource] – URL: <http://www.monolithic.org/homes>
- 5.Alekseev U. V, Kazachinskii V. P., Bondar' V. R. Istorija Arhitektury, gradostroitel'stva i dizajna. [The history of architecture, city construction and design. ] Kurs lekcij. - M. Izdatel'stvo ASV, 2004, - 448s.
- 6.Sychev S.A. Jeko tehnologii stroitel'stva s uchetom kriteriev jenergojektivnosti zdaniy [Eco construction technology , taking into account energy efficiency criteria for buildings.] // Science Time.. - 2014. -№10. - S.343-349.

7. Badygin G.M. Stroitel'sto i rekonstrukcija malojetazhnogo jenergojefektivnogo doma. [Construction and reconstruction of energy-efficient low-rise houses.] - SPb.: BHV - Petersburg, 2011. - 432 s.

8. Anderson B. Solnechnaja jenergija: (Osnovy stroitel'nogo proektirovanija). [Solar energy: (Fundamentals of structural design).] - M.: Stroyizdat, 1982. - 375s.

9. Sychev S.A. Jenergojefektivnyj podhod k vozvedeniju vysotnyh zdaniy. [Energy-efficient approach to the construction of high-rise buildings] // Aktual'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk. - 2014. - №10. - 4 s.

10. Esipova A.A. Primenenie geodezicheskikh kupolov v stroitel'stve: priemushhestvo i nedostatki. [The use of geodesic domes in the building: the advantages and disadvantages.] // Nauka i sovremennost'. - 2015. - №38. - S.8-11.

#### **Об авторах**

**Шанько Полина Сергеевна** (Пермь, Россия) – студент, ПНИПУ, СФ, группа ГСХ-13-16 (e-mail: [pshanko@yandex.ru](mailto:pshanko@yandex.ru)).

**Шишкина Анжелика Викторовна** (Пермь, Россия) – студент, ПНИПУ, СФ, группа ГСХ-13-16 (e-mail: [anzhelika-05@mail.ru](mailto:anzhelika-05@mail.ru))

**Калошина Светлана Валентиновна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» ПНИПУ (614990, г. Пермь, ул. Куйбышева, 109, e-mail: [kaloshina82@mail.ru](mailto:kaloshina82@mail.ru))

#### **About the author**

**Polina S. Shanko** (Perm, Russian Federation) – student, Construction economic and urban planning civil engineering faculty, Perm National Research Polytechnic University. (e-mail: [pshanko@yandex.ru](mailto:pshanko@yandex.ru)).

**Anzhelika V. Shishkina** (Perm, Russian Federation) – student, Constuction economic and urban planning, civil engineering faculty Perm National Research Polytechnic University (e-mail: [anzhelika-05@mail.ru](mailto:anzhelika-05@mail.ru))

**Svetlana V. Kaloshina** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: [spstf@pstu.ru](mailto:spstf@pstu.ru)).