

Научная статья

УДК 72.012

EDN NUELJB

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-2-68-70-75>

Дмитрий Михайлович Козарь¹

Мария Сергеевна Кухта²

^{1,2}Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

¹kozar@tpu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1729-9101>

²kuhta@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8643-785X>

СФЕРА В АРХИТЕКТУРЕ И ДИЗАЙНЕ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМЫ

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения сферической формы в функциональной архитектуре и дизайне с опорой на уникальное геометрическое свойство сферы: минимальная площадь поверхности для заданного объема. Дается краткий исторический очерк и анализ текущих направлений применения сферы в архитектуре, за которыми следует аналитическое исследование зависимости ряда геометрических характеристик сферического сегмента от высоты сегмента при постоянном объеме. Показано, что оптимальное значение, при котором тепловые потери через боковую поверхность сферического сегмента будут минимальными, достигается в случае полусферы, при условии, что тепловыми потерями через основание можно пренебречь. Выделяется диапазон рациональных значений отношения высоты сферического сегмента к радиусу, при котором тепловые потери будут выше оптимальных значений не более чем на 26 %.

Ключевые слова: сфера, шар, сферическая форма, сферическая поверхность, сферический сегмент, тепловая эффективность, тепловые потери, архитектура, техника, дизайн

Для цитирования. Козарь Д. М., Кухта М. С. Сфера в архитектуре и дизайне с точки зрения тепловой эффективности формы // Технологии и качество. 2025. № 2(68). С. 70–75. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-2-68-70-75>.

Original article

Dmitrii M. Kozar¹

Maria S. Kukhta²

^{1,2}Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

THE FIELD OF ARCHITECTURE AND DESIGN IN TERMS OF THERMAL EFFICIENCY OF FORM

Abstract. The article considers the possibility of using spherical form in functional architecture and design with reliance on the unique geometric property of the sphere: minimum surface area for a given volume. A brief historical sketch and an analysis of current directions of sphere application in architecture are given, followed by an analytical study of the dependence of a number of geometric characteristics of a spherical segment on the segment height at constant volume. It is shown that the optimum value at which thermal losses through the lateral surface of a spherical segment will be minimal is reached in the case of a hemisphere, provided that thermal losses through the base can be neglected. The range of rational values of the ratio of the spherical segment height to radius, at which the heat losses will be higher than the optimum values by no more than 26 %, is singled out.

Keywords: sphere, ball, spherical shape, spherical surface, spherical segment, thermal efficiency, heat losses, architecture, technology, design.

For citation: Kozar D. M., Kukhta M. S. The field of architecture and design in terms of thermal efficiency of form. Technologies & Quality. 2025. No 2(68). P. 70–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-2-68-70-75>.

С давних времен сфера и шар являются символами совершенства. Например в работе «Меланхолия» (рис. 1) немецкого художника и гравера эпохи возрождения Альбрехта Дюрера, выполненной в 1514 году, шар изображен рядом со столярными инструментами и отражает вершину мастерства ремесленника. Такой символизм обусловлен тем, что задача изготовления геометрически идеального (визуально) шара на тот момент считалась одной из наиболее сложных.



Рис. 1. Меланхолия. Альбрехт Дюрер

В настоящее время сферические формы находят применение в архитектуре и дизайне, но не столь широкое, какое могло бы быть. В архитектуре сфера в большей степени нашла применение в виде куполов на религиозных, культурных и административных зданиях [1]. В них купол создает ощущение возвышенности, одухотворенности, свободы. Также купол обладает хорошей акустикой, а его конструкция, сферическая или близкая к сферической, является наиболее прочной и легкой из всех возможных.

Начиная с середины XX века, сферическая форма находит самостоятельное применение в архитектуре в виде зданий-куполов, выполненных в форме сферического (шарового) сегмента. Ярким примером воплощения такой архитектуры является известный американский архитектор Бакминстер Фуллер [2]. Однако применение этой формы по-прежнему ограничено. Как правило, это административные и культурные здания в крупных городах, где большой поток туристов, и для которых уникальная архитектура подобного рода зданий является произведением искусства, задача ко-

торого удивлять и привлекать своего зрителя [3, 4]. И сферическая форма здесь играет в большей степени эстетическую роль, нежели функциональную. Такая архитектура может дополняться средствами графического дизайна для формирования городской идентичности [5]. Ярким примером может служить здание-экран MSGSphere (рис. 2), построенное в США, наружная поверхность которого представляет собой огромный экран, а внутренняя – сферический кинотеатр.

У сферы есть еще одно замечательное свойство, помимо прочности, жесткости, легкости, хорошей акустики, и связано это свойство с ее геометрической характеристикой: у сферы наименьшая из всех геометрических фигур площадь поверхности. И это свойство может найти применение в функциональной архитектуре. Современные материалы и технологии позволяют это реализовать в полной мере.



Рис. 2. MSG Sphere – крупнейшее в мире сферическое здание-экран

Температурный диапазон на нашей планете довольно широк: от +56 до –89 °С. Так сложилось, что большая часть территорий России находится в северных широтах, в так называемой вечной мерзлоте. Есть регионы, где температура зимой –40 °С является нормой. При этом архитектура этих регионов не сильно отличается от тех, где предельная температура зимой –4...–10 °С или выше нуля. Во многом это связано с архитектурными традициями, а также с технологичностью, стандартизацией, типизацией и унификацией, задачей которых является обеспечение низкой стоимости и высокой скорости строительства зданий. Сложно представить себе что-то иное, отличное от ставших нам привычными бетонных «коробок».

С другой стороны, на Земле есть много засушливых регионов, где применение сферической формы в архитектуре жилых зданий (как наиболее распространенных) могло бы значительно снизить потребление электрической энергии на кондиционирование, за счет снижения поступления тепла извне.

Таким образом, если поставить во главу угла не стоимость и технологичность, а функциональность, именно функциональность формы в соответствии с природными (температурными) условиями, то архитектура Сибири или, наоборот, жарких регионов и стран должна быть иной, более осмысленной. Ярким примером может быть космическая техника [6], где сферическая форма широко используется именно из-за ее уникальных геометрических характеристик.

Конечно, современные отделочные и изолирующие материалы с низкой теплопроводностью позволяют существенно снизить тепловые потери жилых зданий. Однако эти материалы можно использовать вне зависимости от формы зданий, и их применение для зданий сферической формы, имеющих минимальную площадь поверхности для заданного объема, даст куда больший эффект экономии тепла, а значит и топлива, необходимого для генерации этого тепла. Таким образом, форма здания сама по себе оказывает влияние на энергоэффективность и экологичность городской застройки.

Из курса физики хорошо известно, что тепловые потери пропорциональны площади поверхности. Достаточно вычислить площади поверхностей различных геометрических форм при неизменном объеме, чтобы можно было сравнивать их тепловую эффективность относительно друг друга, в первом приближении.

Важно отметить, что применение в архитектуре находит не сфера в чистом виде, а сферический сегмент (рис. 3), объем V которого можно определить по формуле

$$V = \pi h^2 \left(R - \frac{h}{3} \right), \quad (1)$$

где h – высота сегмента;

R – радиус сферы.

Примем, что $V = \text{const}$, а высоту сегмента h выразим как $h = kR$, где $k \in [0; 2]$. Таким образом, $h_{\min} = 0$, а $h_{\max} = 2R$. Выразим R из формулы (1) при $V = \text{const}$, $h = kR$, $k \in [0; 2]$. Получим

$$R = \sqrt[3]{\frac{1}{\pi k^2 (1 - k/3)}} \cdot \sqrt[3]{V}, \quad k \in [0; 2]. \quad (2)$$

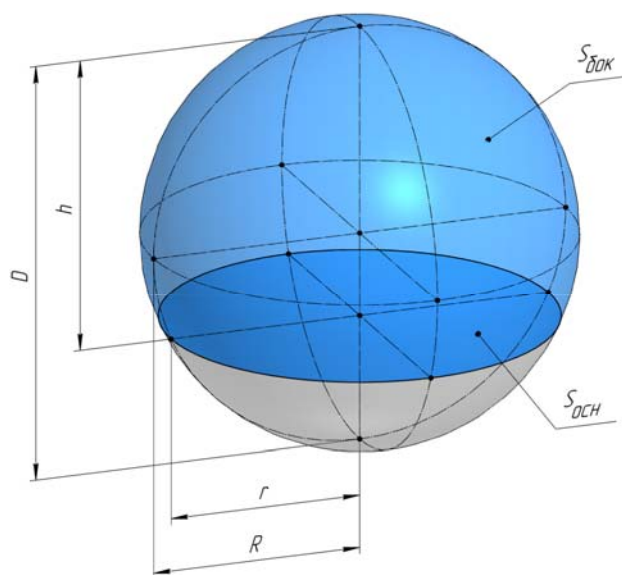


Рис. 3. Сферический сегмент и его геометрические параметры

Радиус основания сферического сегмента r определяется по формуле

$$r = \sqrt{2Rh - h^2}. \quad (3)$$

При $h = kR$ получим

$$r = R\sqrt{2k - k^2}, \quad k \in [0; 2]. \quad (4)$$

Графики зависимостей R и r от k , $k \in [0; 2]$ для сферы единичного объема ($V = 1$) показаны на рисунке 4.

Значения по осям безразмерные. Чтобы найти значение R при заданном объеме, например при $V = 100 \text{ м}^3$, и при $k = 0,5$, умножим значение R , найденное по графику, в данном случае $R = 1,16$, на $\sqrt[3]{100} = 4,64$ и получим $R = 5,38 \text{ м}$, $r = 4,65 \text{ м}$. Видно, что единицы измерения радиусов R и r зависят от единиц измерения объема V . Это позволяет абстрагироваться от единиц измерения и сравнивать только количественные показатели форм, полученные при $V = 1$.

Из графика (см. рис. 4) видно, что значение радиуса R минимально при $k = 2$, т. е. для сферы. При уменьшении k значение радиуса R начинает расти по экспоненте. Асимптотически приближаясь к малым значениям $0 < k < 0,2$, радиус сферического сегмента R стремительно увеличивается. Для радиуса основания r сферического сегмента все вышесказанное также справедливо, за исключением того, что при $k = 2$ $r = 0$. При $k = 1$ значения радиусов R и r равны,

так как в этом случае мы имеем дело с полусферой.

Площадь боковой поверхности сферического сегмента определяется по формуле

$$S_{\text{бок}} = 2\pi R h = 2\pi k R^2, k \in [0; 2],$$

площадь основания

$$S_{\text{осн}} = \pi r^2 = \pi(2k - k^2)R^2, k \in [0; 2],$$

а общая площадь поверхности тогда равна их сумме

$$S_{\text{общ}} = S_{\text{бок}} + S_{\text{осн}}.$$

Графики зависимостей $S_{\text{бок}}$, $S_{\text{осн}}$ и $S_{\text{общ}}$ от k , $k \in [0; 2]$ для сферы единичного объема ($V = 1$) показаны на рисунке 5. Значения по осям безразмерные.

Из графика (см. рис. 5) видно, что $S_{\text{общ}}$ при уменьшении k растет, т. е. сферический сегмент

при равном объеме имеет большую площадь, чем у сферы. Однако в случае, если сферический сегмент опирается основанием на поверхность, температура и теплопроводность которой не оказывают существенного влияния на тепловые потери через основание, то площадь основания можно исключить из определения тепловой эффективности. Тогда имеет смысл рассматривать лишь тепловые потери через боковую поверхность сферического сегмента с площадью $S_{\text{бок}}$.

Из графика (см. рис. 5) видно, что площадь боковой поверхности с уменьшением значения коэффициента k сперва снижается и лишь при $k < 1$ начинает расти по экспоненте. Таким образом, при $k \in [0,27; 2]$ (рис. 6) тепловая эффективность сферического сегмента, опирающегося на поверхность с низкой теплопроводностью, может быть даже выше, чем у сферы, или сопоставима. В ином случае, если потерями тепла через основание пренебречь нельзя, площадь основания $S_{\text{осн}}$ нужно учитывать, и она должна быть как можно меньше.

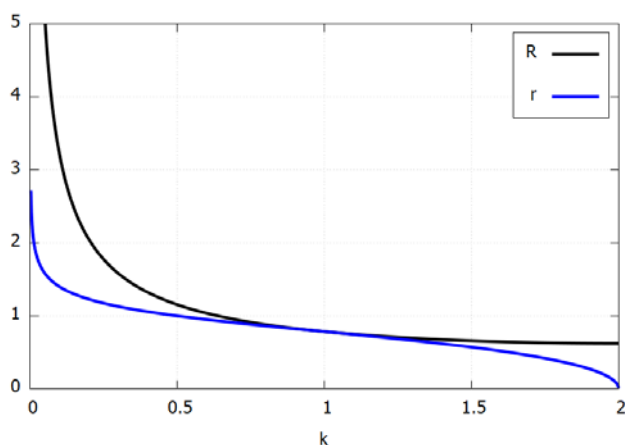


Рис. 4. Зависимость радиусов R и r сферического сегмента от k при $V = 1$

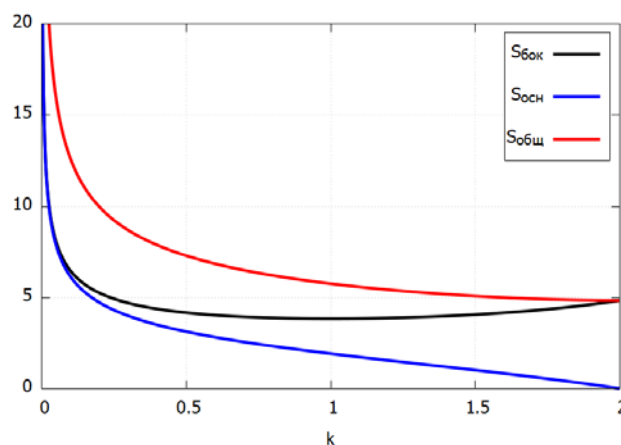


Рис. 5. Зависимость площадей $S_{\text{бок}}$, $S_{\text{осн}}$ и $S_{\text{общ}}$ сферического сегмента от k при $V = 1$

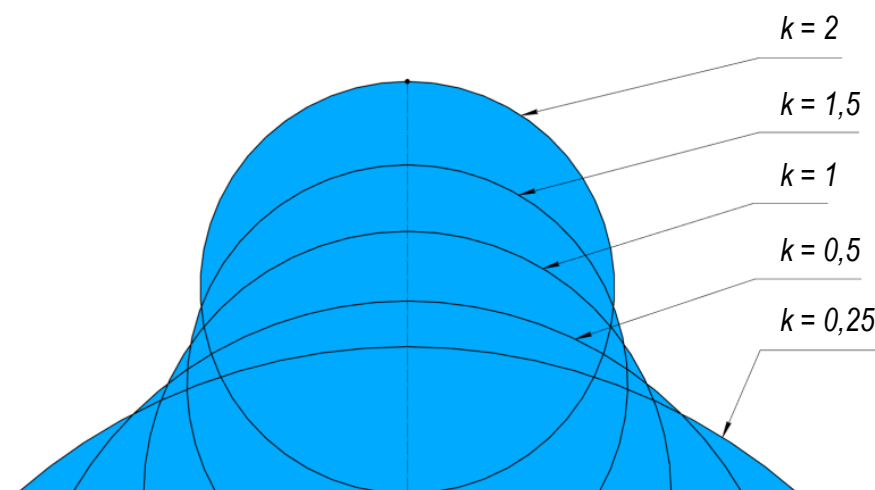


Рис. 6. Сечения сферических сегментов, опирающихся на плоскость, полученные при разных значениях k и при $V = \text{const}$

Резюмируя все вышеперечисленное, можно утверждать, что оптимальное значение коэффициента $k = 1$, при котором тепловые потери через боковую поверхность сферического сегмента будут минимальными. Также следует выделить диапазон значений $0,27 < k < 2$, на границах которого тепловые потери через боковую поверхность будут выше, не более чем на 26 %.

Если сравнивать тепловую эффективность геометрических форм как отношение площадей их поверхностей при $V = \text{const}$, то сфера эффективнее куба на 25 %.

Если сферический сегмент опирается на поверхность, тепловыми потерями через которую можно пренебречь, то тепловая эффективность такого сегмента может быть даже выше, чем у сферы.

Следует отметить, что применимость данного материала не ограничивается одной лишь архитектурой. Он применим и к дизайну нагревательных приборов, где снижение тепловых

потерь может быть важным, например бытовых чайников, термосов или промышленных котлов. Кроме того, объект может быть не полностью сферическим, а дополненным элементами из других геометрических форм (рис. 7).

Также могут быть составлены программы на основе алгоритмов или нейронных сетей, генерирующие массивы новых оригинальных объектов дизайна [7, 8] путем комбинирования различных геометрических форм в разных пропорциях, из которых уже эксперт выберет наиболее интересные.

ВЫВОД

Таким образом, уникальные геометрические свойства сферической формы, приводящие к минимизации тепловых потерь через боковую поверхность, с успехом позволяют использовать ее в функциональной архитектуре и дизайне бытовых приборов.

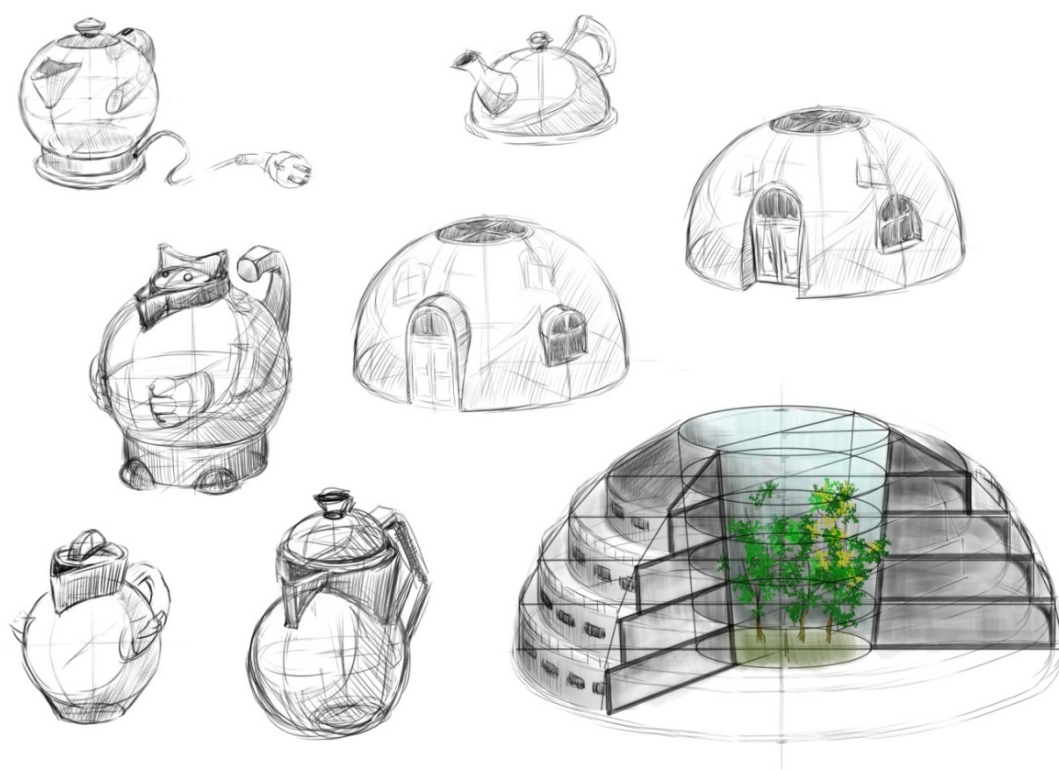


Рис. 7. Наброски возможных вариантов применения сферической формы в дизайне бытовых приборов и архитектуре

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алборова Л. А., Мамиева И. А. Криволинейные формы в архитектуре зданий и сооружений в начале XXI века // Строительство и реконструкция. 2023. № 5. С. 76–86.
2. Третьякова Е. Г., Иванова Ж. В. Сферические формы в архитектуре // V Бетанкуровский Международный инженерный форум : сборник трудов (Санкт-Петербург, 29 ноября – 01 декабря 2023 г.) / Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. СПб., 2023. С. 189–193.

3. Ермоленко Е. В. Сфера в современной архитектуре // Современная архитектура мира. 2018. № 11. С. 55–82.
4. Каминская М. Д., Воробьев А. Е., Чеснокова О. Г. Сферические формы в современной архитектуре // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса : сборник трудов Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч., Волгоград, 07–08 декабря 2021 г. Ч. 2. Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2021. С. 440–445.
5. Рябинина-Задерновская В. Е. Формирование городской идентичности средствами графического дизайна (на примере Санкт-Петербурга) // Технологии и качество. 2023. № 3(61). С. 57–63.
6. Кукина А. В., Кухта М. С. Определение основных предпосылок к появлению термина «космическая эргономика» // Технологии и качество. 2024. № 1(63). С. 52–57.
7. Мамедова И. Ю., Чуринов А. С., Оранская И. А. Оригинальность объектов дизайна, полученных при помощи нейронных сетей // Технологии и качество. 2023. № 2(60). С. 62–69.
8. Дронов В. В., Кухта М. С. Дизайн керамических изделий с помощью подключаемого программного модуля AutoMorph // Известия Томского политехнического университета. 2011. № 5. С. 154–159.

REFERENCES

1. Alborova L. A., Mamieva I. A. Curvilinear forms in the architecture of buildings and structures up to the XXI century. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya* [Building and Reconstruction]. 2023;3:154–164. (In Russ.)
2. Tretyakova E. G. Ivanova Zh. V. Spherical shapes in architecture. *V Betankurovskij Mezhdunar. inzhenernyj forum : sbornik trudov (Sankt-Peterburg, 29 noyabrya – 01 dekabrya 2023 g.)* [V Betancourt International Engineering Forum : Proceedings in 2 volumes, St. Petersburg, 29 November – 01 December 2023]. Saint-Petersburg, 2023. P. 189–193. (In Russ.)
3. Ermolenko E. V. Sphere in modern architecture. *Sovremennaya arhitektura mira* [Modern architecture of the world]. 2018;11:55–82. (In Russ.)
4. Kaminskaya M. D., Vorob'iev A. E., Chesnokova O. G. Spherical forms in modern architecture*. *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa : sbornik trudov Mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konferencii : v 2 ch., Volgograd, 07–08 dekabrya 2021 g. Ch. 2* [Actual problems and prospects of development of the construction complex : proceedings of the International Scientific and Practical Conference : in 2 parts, Volgograd, 07–08 December 2021] Ch. 2. Volgograd, 2021. P. 440–445. (In Russ.)
5. Ryabinina-Zadernovskaya V. E. Formation of city identity by means of graphic design (the example of Saint Petersburg). *Tekhnologii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2023;3(61):57–63. (In Russ.)
6. Kuklina, A. V., Kukhta M. S. Definition of the main prerequisites for the emergence of the term “space ergonomics”. *Tekhnologii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2024;1(63):52–57. (In Russ.)
7. Mamedova I. Yu., Churin A. S., Oranskaya I. A. Originality of design objects created with the help of neural networks. *Tekhnologii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2023;2(60):62–69. (In Russ.)
8. Dronov V. V., Kukhta M. S. Design of ceramic products using the plug-in software module AutoMorph. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University]. 2011;5:154–159. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 23.04.2025
Принята к публикации 20.05.2025

* Перевод названия источника выполнен авторами статьи / Translated by author's of the article.