

Энергетическая оптимизация объемно-планировочных решений зданий сферической формы

Горбанева Елена Петровна (Воронеж). Кандидат технических наук, доцент. Кафедра технологии, организации строительства, экспертизы и управления недвижимостью Воронежского государственного технического университета (Россия, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84. ВГТУ); Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: egorbaneva@vgasu.vrn.ru.

Аннотация. Важность задачи энергосбережения в строительном секторе определяется значительной долей первичной энергии, потребляемой в ходе строительного производства и эксплуатации объектов капитального строительства. Энергетическая эффективность жизненного цикла объекта капитального строительства определяется геометрическими и теплофизическими характеристиками ограждающих конструкций. Особую роль в достижении энергоэффективности играют объемно-планировочные решения. Проанализированы зарубежные проекты купольных зданий середины XX века, запроектированные такими архитекторами, как Ричардом Бакминстером Фуллером, Николасом Гримшоу, архитекторами Мерфи и Макки, Эберхардом Генрих Зейдлером и другими. В результате работы определена зависимость коэффициента компактности здания, имеющего форму шарового сегмента, от радиуса купольной части и высоты, рассчитаны мощности тепловых потерь через поверхности ограждающих конструкций, линейные и точечные теплонапряженные элементы, определены полные потери тепловой энергии за отопительный период через ограждающие конструкции зданий, имеющих форму шарового сегмента, а также сформулированы методы энергетической оптимизации объемно-планировочных решений таких зданий. Выявлено, что при увеличении коэффициента компактности возрастает расход ресурсов на изготовление и монтаж ограждающих конструкций и уменьшается энергоэффективность здания.

Ключевые слова: энергоэффективность; энергоэффективные здания; жизненный цикл; объемно-планировочные решения; сферическая форма; компактность.

Финансирование. Исследование выполнено за счёт средств государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» на 2021–2030 годы в рамках Плана фундаментальных научных исследований РААСН и Минстроя России на 2023 год, тема № 3.1.7.1 «Научно-методологические основы создания цифровой платформы для многоаспектной реконструкции сложившихся городских территорий».

Благодарность. Исследования, результат которых изложен в данной статье, проводились с использованием оборудования ЦКП имени проф. Ю.М. Борисова ВГТУ, при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 075-15-2021-662.

Energy Optimization of Space-Planning Solutions for Spherical Buildings

Gorbaneva Elena P. (Voronezh). Candidate of Technical Science, Docent. The Department of Technology, Organization of Construction, Expertise and Property Management of the Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh, 394006, Russia. VSTU); The Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21, Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russia). E-mail: egorbaneva@vgasu.vrn.ru.

Abstract. The importance of the task of energy saving in the construction sector is determined by a significant proportion of primary energy consumed during construction production and operation of capital construction facilities. The energy efficiency of the full life cycle of a capital construction object is determined by the geometric and thermophysical characteristics of the enclosing structures. Space-planning solutions play a special role in achieving energy efficiency. The foreign projects of domed buildings of the mid-twentieth century, designed by such architects as Richard Buckminster Fuller, Nicholas Grimshaw, Murphy and McKee architects, as well as Eberhard Heinrich Seidler, are analyzed. As a result of the work, the dependence of the compactness coefficient of a building having the shape of a ball segment on the radius of the dome part and height is determined, the power of heat losses through the surfaces of enclosing structures, linear and point heat-stressed elements are calculated, and the total loss of thermal energy over the heating period through the enclosing structures of buildings having the shape of a ball segment is calculated, and methods of energy efficiency are formulated. optimization of space-planning solutions of such buildings. It is revealed that with an increase in the compactness coefficient, the consumption of resources for the manufacture and installation of enclosing structures increases and the energy efficiency of the building decreases. Only the first effect is adequately described within the framework of a geometric description.

Keywords: energy efficiency; energy-efficient buildings; life cycle; space-planning solutions; spherical shape; compactness.

Funding. The research was carried out with the funds of the state program of the Russian Federation "Scientific and Technological Development of the Russian Federation" for 2021–2030 within the Plan of Fundamental Scientific Research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences and the Ministry of Construction of Russia for 2022, topic No. 3.1.7.1 "Scientific and Methodological Basis for Creating a Digital Platform for the Multidimensional Reconstruction of Established Urban Areas.

Acknowledgment. The studies, the results of which are described in this paper, were conducted using the equipment of the VSTU Prof. Y.M. Borisov Central Clinical Laboratory, with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. 075-15-2021-662.

Введение

В начале XXI века человечество столкнулось с новыми вызовами, наиболее ярко проявляющимися в энергетике и экологии. Большая часть из них относится к строительному сектору, на который приходится треть мирового потребления энергии и пятая часть выбросов парниковых газов [1]. Важность энергосбережения и сокращения выбросов парниковых газов для строительной отрасли была признана во всем мире на самых высоких уровнях. При этом, наряду с вызовами, появились и новые возможности, связанные, в частности, с процессом цифровизации всей социально-экономической сферы [2]. Этот процесс определяется как развитием соответствующих технологий (прежде всего микроэлектроники и телекоммуникаций, IT-технологий), так и коренными изменениями всей парадигмы развития общества, вследствие чего информация превратилась в главный ресурс, определяющий направление и темп социально-экономического развития [3–5]. Процесс цифровизации происходит также и в России [6].

Цифровизация в значительной мере определяет и прогресс строительной отрасли. Основное направление внедрения цифровых технологий связано с информационным моделированием жизненного цикла проектов [7; 8] и, в частности, объёмно-планировочных решений. Этот подход открывает значительные перспективы для преодоления разрыва в энергоэффективности зданий.

Теоретическая база исследования сформирована на основе трудов российских и зарубежных учёных, в том числе посвящен-

ных вопросам определения оптимальной формы, размеров и ориентации зданий с целью повышения их энергоэффективности. Наиболее значительные результаты в этой области получены Ю.А. Табунчиковым, М.М. Бродач, С.Г. Шеиной, Л.А. Опариной, Б.И. Гиясовым, А.Я. Лаховым, Г.Н. Павловым, Р.Б. Фуллер, Н. Фостер, Джихан Л. К. Гарас, Хала Г. Эль Кади, Айман Х. Эль Альфи, Мохаммаджавад Махдавинежад, Негар Бадри, Марьям Фахари, Махья Хакшенас, С.Э. Дональдсон, С.Г. Сигел и другими.

От объёмно-планировочных решений зависят и архитектурный облик здания и энергоэффективность [9]. В первом приближении в соответствии со СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»¹ энергетическая оптимизация объёмно-планировочных решений требует, в частности, уменьшения коэффициент компактности K (m^{-1}), определяемого как отношение общей площади поверхности наружных ограждающих конструкций S к объёму V , заключённому внутри них:

$$K = S/V. \quad (1)$$

Для наиболее часто встречающихся зданий, имеющих форму параллелепипеда, верхняя граница значений коэффициента компактности директивно лимитирована нормативами, монотонно падающими с ростом этажности здания. Однако

¹ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (<https://docs.cntd.ru/document/1200095525>).

энергетическая оптимизация жизненного цикла объекта капитального строительства требует использования альтернативных объёмно-планировочных решений.

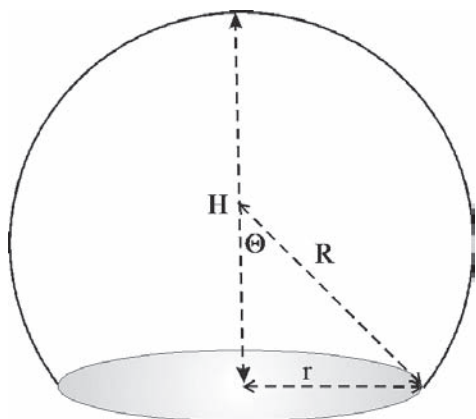


Рис. 1. Схематический вид оптимальной геометрической формы энергосберегающих зданий²

При фиксированном полезном объёме точная нижняя граница коэффициента компактности K_{\min} реализуется для зданий сферической формы и следующим образом выражается через радиус внешней ограждающей конструкции R :

$$K_{\min} = \frac{4\pi R^2}{4\pi R^3/3} = \frac{3}{R}. \quad (2)$$

Однако возведение таких формально оптимальных зданий, имеющих нулевую площадь опоры, практически невозможно. Поэтому в проектах энергосбережения реализуются решения, схематический вид которых отражён на рисунке 1.

Такую же форму имеют жилища аборигенов местностей, характеризующихся суровыми климатическими условиями, которые определяют высокие требования к энергетической эффективности зданий.

² Все иллюстрации в статье, кроме особо оговорённых, выполнены Е.П. Горбаневой.



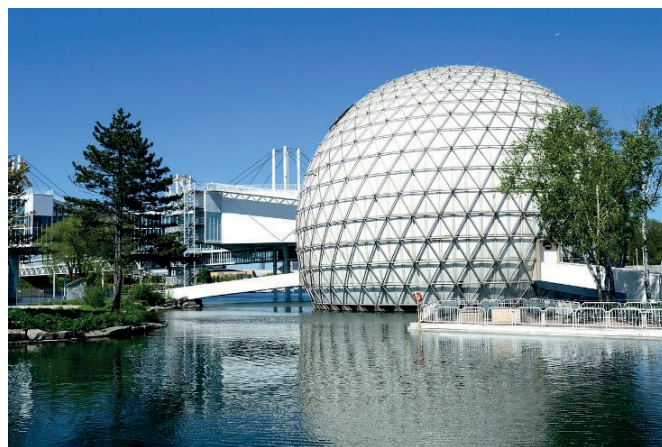
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Примеры купольных зданий. Фото из открытого доступа сети Интернет: а) геодезический купол Фуллера. Музей Биосферы в Монреале. Квебек, Канада (1967 год постройки); б) ботанический сад «Эдем» (Eden Project) в графстве Корнуолл. Великобритания (1998–2001 годы постройки); в) геодезический купол оранжереи ботанического сада «Климатрон». Сент-Луис, штат Миссури, США (1960-е годы постройки); г) кинотеатр «Синесфизер» (Cinesphere). Торонто, провинция Онтарио. Канада (1971 год постройки)

В практике строительства купольные здания связаны с пионерными проектами Ричарда Бакминстера Фуллера [10] середины XX века (рис. 2). Так, например, ботанические сады «Эдем» (британский архитектор Николас Гримшоу, рис. 3), геодезический купол оранжереи Ботанического сада Климатрон (архитекторы Мерфи и Макки, рис. 4), крупнейший кинотеатр IMAX в Онтарио (архитектор Эберхард Генрих Зейдлер, рис.5) являются также яркими примерами купольных зданий, имеющих полусферическую форму.

На современном этапе развития архитектуры повысился интерес к зданиям такой формы [11]. Это обусловлено тем, что кроме высокой энергоэффективности купольные здания обладают ещё рядом достоинств. В частности, реализация купольной конструкции не требует несущих опор, что позволяет значительно облегчить ограждающие элементы при достаточной прочности и надёжности конструкции. Вследствие этого снижаются требования к несущим свойствам фундамента [12; 13].

Исследования показали, что в актуальной практике отечественного и мирового строительства купольные здания технологически реализуются на геодезическом каркасе в виде триангулярной полусферы [14] или (в последнее время) в виде стратодезического купола из металлопроката или монолитного железобетона [15; 16]. Поэтому интерес к применению купольных конструкций динамично возрастает [17; 18].

Определим зависимость коэффициента компактности купольной конструкции от геометрических параметров R и H .

Площадь внешней ограждающей конструкции S равна сумме площадей сферического сегмента высотой H , радиусом R и лежащего в основании круга радиусом r . Площадь поверхности сегмента определяется выражением [19]:

$$S_1 = 2\pi R^2(1 + \cos \Theta) = 2\pi R^2 \left(1 + \frac{H - R}{R}\right) = 2\pi \cdot R \cdot H. \quad (3)$$

Площадь основания здания связана с параметрами объёмно-планировочного решения следующим образом:

$$S_2 = \pi \cdot r^2 = \pi [R^2 - (H - R)^2] = \pi H(2R - H) \quad (4)$$

Учитывая (3) и (4), получим следующее выражение для полной площади внешней ограждающей конструкции:

$$S = 2\pi \cdot R \cdot H + \pi H(2R - H) = \pi H \cdot (4R - H). \quad (5)$$

В предельных случаях $H=0$ и $H=2R$ формула (5) даёт нулевое значение полной площади и площади полной сферы соответственно.

Полезный объём здания, равный разности объёма шара и объёма, отсекаемого основанием, можно вычислить по формуле [20]:

$$V = \frac{\pi H^2}{3} (3R - H). \quad (6)$$

Подставляя выражения (5) и (6) в определение (1) получим следующее выражение для геометрического коэффициента компактности усечённого шара:

$$K = \frac{\pi H(4R - H)}{\frac{\pi H^2}{3}(3R - H)} = \frac{3(4R - H)}{H(3R - H)}. \quad (7)$$

Условие экстремума функции (7) имеет вид:

$$\frac{dK}{dH} = 3 \frac{8RH + H^2 + 12R^2}{(3R - H)^2} = 0. \quad (8)$$

Уравнение (8) имеет два решения $H_{ext} = 2R$ и $H_{ext} = 6R$, лишь первое из которых лежит в области определения функций (5), (6) и соответствует условию (2).

Графики зависимости коэффициента компактности от соотношения высоты здания и радиуса купольной части приведены в логарифмическом по оси ординат масштабе на рисунках 3 и 4.

На рисунке 3 по оси ординат отложены значения $lg_{10}(K)$. Значение $x=2$ соответствует формально оптимальному, но практически трудно реализуемому сферическому зданию; значение $x=1$ описывает наиболее распространённое в прак-

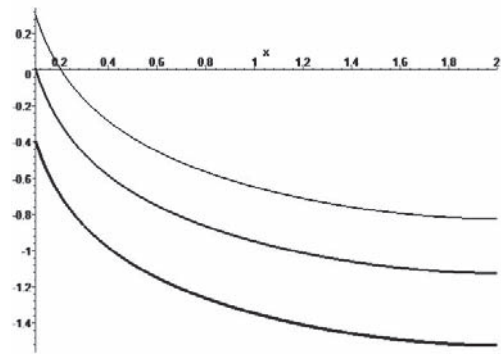


Рис. 3. Зависимость коэффициента компактности K (m^{-1}), от параметра $x=H/R$ для значений $R=20, 40, 100$ (кривые направлены сверху вниз по мере увеличения толщины линии). Рисунок Е.П. Горбаневой

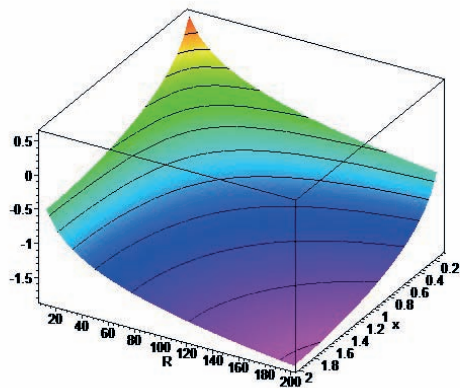


Рис. 4. Зависимость коэффициента компактности K (m^{-1}) (ось аппликата) от параметра $x=H/R$ (ось ординат) и R (ось абсцисс)

тике здание полусферической формы. Наглядно видна оптимизация объемно-планировочного решения как при увеличении радиуса купольной части, так и при росте высоты здания.

На рисунке 4 масштаб по оси аппликат логарифмический. Линии равного значения $Ig10(K)$ расположены с шагом, равным 0,2.

Нормированная на оптимальное значение (2) зависимость коэффициента компактности от безразмерного параметра $x=H/R$ даётся соотношением

$$K_{norm} = \frac{x-4}{x \cdot (x-3)}, \tag{9}$$

степенные аппроксимации которого в точках $x=0$ – неоптимальное купольное здание малой высоты, $x=1$ – часто используемое в практике купольное полусферическое здание, $x=2$ – оптимальное сферическое здание, имеют вид:

$$\begin{aligned} K_{norm}^0 &= \frac{36+3x+x^2}{27x}, \\ K_{norm}^1 &= \frac{12-10(x-1)+(x-1)^2}{8}, \\ K_{norm}^2 &= 1 + \frac{(x-2)^2}{2}. \end{aligned} \tag{10}$$

Как видно из равенства (10), в разложении отсутствует линейный член, что обеспечивает широкую область значений нормированного коэффициента компактности, близких к оптимальному значению $K_{norm} \approx 1$, что видно на рисунке 5.

Таким образом, наиболее часто используемые в практике объемно-планировочные решения в виде полусферы характеризуются коэффициентом компактности достаточно далёким от оптимального значения $K_{norm}(1) = 3/2$, в то время как $K_{norm}(3/2) = 10/9$ лишь на 10% превышает минимальную величину.

На рисунке 5 жирной линией изображена точная зависимость, тонкой линией отражена аппроксимация K_{norm}^0 . Наглядно видна широкая область далёких от оптимума значений при малых значениях параметра $x \geq 1,5$ и интервале $x \geq 1,5$ близких к оптимальному значению $K_{norm}^{min} = 1$.

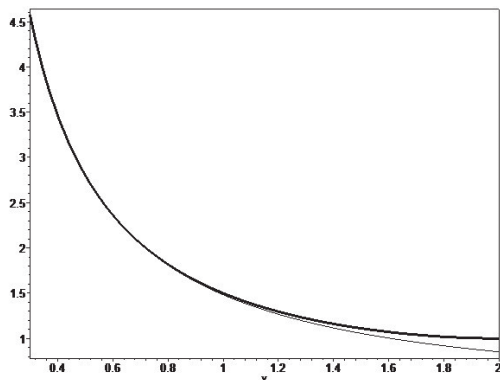


Рис. 5. Зависимость отношения коэффициента компактности от безразмерного параметра $x=H/R$ к оптимальному значению

На рисунке 6 представлена зависимость нормированного коэффициента компактности от положения основания конструкции. Шаг положения равен $R/2$. Наглядно видно быстрое уменьшение значения K_{norm} для купольной части меньшей полусферы.

Таким образом выявлено, что увеличение коэффициента компактности, с практической точки зрения соответствующее росту площади ограждающих конструкций при фиксированном полезном объеме здания, приводит к негативным последствиям двух типов. Во-первых, в этом случае растёт расход как складываемых, так и нескладываемых ресурсов на изготовление и монтаж ограждающих конструкций. Этот негативный эффект адекватно описывается геометрическим параметром (1). Однако, кроме геометрических свойств объёмно-планировочных решений, при увеличении площади ограждающих конструкций растёт и тепловой поток через ограждающие конструкции, что приводит к ухудшению энергетических характеристик здания.

* * *

Исследования показали, что стандартные объёмно-планировочные решения зданий в форме параллелепипедов не являются оптимальными как по значениям коэффициента компактности, так и по критериям энергоэффективности жизненного цикла объекта. С другой стороны, здания, имеющие форму шара, оптимальные по отношению площади ограждающих конструкций к полезному объёму, не могут быть практически реализованы. Поэтому значительный интерес проектировщиков привлекают сооружения, имеющие форму шарового сегмента. Такие сооружения являются традиционными для аборигенов высоких широт, в которых требования энергоэффективности жилищ являются определяющими.

Во второй половине XX века интерес к таким объёмно-планировочным решениям значительно возрос и в зарубежной, и в отечественной практике, что определяется рядом их характеристик, значение которых увеличилось в связи с обострением энергетических и экологических проблем.

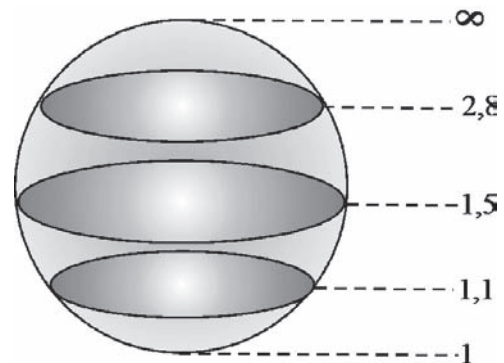


Рис. 6. Зависимость нормированного коэффициента компактности от положения основания конструкции

При малых значениях коэффициента компактности кроме высокой энергоэффективности достигается также экономия складываемых и нескладываемых ресурсов за счёт уменьшения веса ограждающих конструкций, так и за счёт снижения требований к фундаментам. Кроме того, такие здания имеют малое аэродинамическое сопротивление и, что немаловажно в условиях России, их форма препятствует накоплению снега.

Функция коэффициента компактности купольной оболочки, определяемого только её радиусом и высотой, имеет один минимум, соответствующий шаровой конструкции. Наиболее часто используемое в практике объёмно-планировочное решение в виде полусферы характеризуется коэффициентом компактности, на 50% отличающимся от оптимального. Доказано, что при уменьшении высоты здания значение геометрического коэффициента K быстро возрастает, что вызывает рост расходов на материалы и монтаж ограждающих конструкций, а также приводит к ухудшению энергетических характеристик здания.

Следует отметить, что при энергетической оптимизации объёмно-планировочных решений зданий необходимо учитывать зависимость тепловых потерь здания от климатических характеристик региона строительства (скорость и направление ветра, интенсивность солнечной радиации и т.д.), что позволит определить направление дальнейшей работы.

Список литературы

1. *Stepanov, V.* Indices for Estimation of Energy Conservation in Space Heating / V. Stepanov, N. Starikova, T. Stepanova. – DOI: 10.1016/S0378-7788(99)00013-4. – Текст : электронный // *Energy and Buildings*. – 2000. – Vol. 31, № 3. – P. 189–193. – URL: https://www.researchgate.net/publication/223661378_Indices_for_estimation_of_energy_conservation_in_space_heating (дата обращения 16.01.2023).
2. *Grabovyy, P.* Digitalization of the World Economy – a Factor in the Development of Society / P. Grabovyy. – DOI: 10.1051/e3sconf/201913504058. – Текст : электронный // *E3S Web of Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019, Divnomorskoe Village, 09–14 сентября 2019 года*. – Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019. – P. 04058. – URL: https://www.researchgate.net/publication/337736126_Digitalization_of_the_world_economy_-_a_factor_in_the_development_of_society (дата обращения 16.01.2023).
3. *Problems of Implementing of the Housing Renovation Program in Russian Federation* / V.B. Vlasov, V.Y. Mischenko, E.P. Gorbaneva, D.I. Yemelianov. – DOI: 10.15405/epsbs.2021.09.02.92. – Текст : электронный // *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences EpSBS. II International Conference on Economic and Social Trends for Sustainability of Modern Society*. Krasnoyarsk, May 19–21, 2021. – Krasnoyarsk, Russia : ISO London Limited – European Publisher, 2021. – P. 811–817. – URL: https://www.europeanproceedings.com/files/data/article/10076/14994/article_10076_14994_pdf_100.pdf (дата обращения 16.01.2023).

com/files/data/article/10076/14994/article_10076_14994_pdf_100.pdf (дата обращения 16.01.2023).

4. Повышение энергоэффективности жилых зданий при проведении капитального ремонта / В.Я. Мищенко, Е.П. Горбанева, Е.В. Овчинникова, К. С. Севрюкова. – Текст : непосредственный // *ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия*. – 2019. – Т. 16. – № 1. – С. 66–72.

5. *Dubova, Y.I.* Information and Communication Technologies as a Modern Institute of Increase of Effectiveness of Marketing Activities in Russia / Y.I. Dubova. – DOI:10.1007/978-3-319-90835-9_45. – Текст : электронный // *Advances in intelligent systems and computing*. – 2019. – no. 726. – P. 386–392 (2019). – URL: https://www.researchgate.net/publication/281467794_Innovation_Ecosystems_A_Collaborative_Networks_Perspective (дата обращения 16.01.2023).

6. Индикаторы цифровой экономики: 2018: статистический сборник / Г. И. Абдрахманова, К. О. Вишневецкий, Г. Л. Волкова [и др.]. – DOI 10.17323/978-5-7598-1770-3. – Текст : непосредственный. – Москва : Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2018. – 268 с. – ISBN 978-5-7598-1770-3.

7. *Шейна, С.Г.* Исследование этапов развития BIM-технологий в мировой практике и России / С.Г. Шейна, К.С. Петров, А.А. Фёдоров. – Текст: непосредственный // *Строительство и техногенная безопасность*. – 2019. – № 14 (66). – С. 7–14.

8. *Patrick, X.* Life-Cycle Building Information Modelling (BIM) Engaged Framework for Improving Building Energy Performance / Patrick X. W. Zou, Xiaoxiao Xu, Tim Mumford. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110496. – Текст : электронный // *Energy and Buildings*. – 2020. – № 231 (7). – P. 110496. – URL: https://www.researchgate.net/publication/346102711_Life-cycle_building_information_modelling_BIM_engaged_framework_for_improving_building_energy_performance (дата обращения 16.01.2023).

9. Оптимизация архитектуры и инженерного обеспечения современных зданий в целях повышения их энергетической эффективности / А.А. Волков, Б.И. Гиясов, П.Д. Челышков [и др.]. – Текст : непосредственный // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2014. – № 6. – С. 111–113.

10. *Fuller, R. B.* Geodesic Dome / R.B. Fuller // *Perspecta*. – 1952 – № 1. – P. 30–33. – Текст : непосредственный

11. *Гиясов, Б.И.* Влияние энергоэффективности зданий на экологический баланс окружающей среды / Б.И. Гиясов, А.В. Цева. – Текст : непосредственный // *Научное обозрение*. – 2015. – № 4. – С. 174–177.

12. *Волков, А.А.* Иерархии представления энергетических систем / А.А. Волков. – Текст : непосредственный // *Вестник МГСУ*. – 2013. – № 1. – С. 190–193.

13. *Гиясов, Б.И.* Влияние развития инфраструктуры городов на жилую среду / Б.И. Гиясов. – Текст : непосредственный // *Вестник МГСУ*. – 2012. – № 4. – С. 17–21.

14. Савенок, А.Ф. Основы экологии и рационального природопользования / А.Ф. Савенок, Е.И. Савенок. – Минск : Сэр-Вит, 2004. – 432 с. – ISBN 985-419-204-0: 7360.00. – Текст : непосредственный.

15. Gihan L. K. Garas. Developing a New Combined Structural Roofing System of Domes and Vaults Supported by Cementitious Straw Bricks / Gihan L. K. Garas, Hala G. El Kady, Ayman H. El Alfy. – Текст : электронный // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2010. – № 4. – P. 44–55. – URL: arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2010/jeas_0410_324.pdf.

16. Mohammadjavad Mahdavejad. The Role of Domed Shape Roofs in Energy Loss at Night in Hot and Dry Climate (Case Study: Isfahan Historical Mosques Domes in Iran) / Mohammadjavad Mahdavejad, Negar Badri, Maryam Fakhari, Mahya Haqshenas. – Текст : электронный // American Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2013. – № 6. – URL: http://pubs.sciepub.com/ajcea/1/6/1/

17. Павлов, Г.Н. Автоматизация архитектурно-строительного проектирования геодезических куполов и оболочек: диссертация... доктора технических наук: 05.13.12 / Павлов Г.Н. – Нижний Новгород, 2007. – 274 с.

18. Лахов, А.Я. Разработка классификации геодезических куполов / А.Я. Лахов. – Текст : непосредственный // Приволжский научный вестник. – 2016. – № 1 (53). – С. 44–47.

19. Donaldson, S.E. Successful Software Development (2nd ed.) / S.E. Donaldson, S.G. Siegel. – Текст : непосредственный. – Upper Saddle River : Prentice Hall, Inc., 2001. – 354 з. – ISBN 0-13-086826-4.

20. Polyanin, A.D. Handbook of Mathematics for Engineers and Scientists / Polyanin A.D., Manzhairov A.V. Chapman & Hall. – Текст : непосредственный // CRC. – 2007. – 69 p. – ISBN 9781584885023.

References

1. Stepanov V., Starikova N., Stepanova T. Indices for Estimation of Energy Conservation in Space Heating. In: *Energy and Buildings*, 2000, Vol. 31, no. 3, pp. 189–193. URL: https://www.researchgate.net/publication/223661378_Indices_for_estimation_of_energy_conservation_in_space_heating (Accessed 01/16/2023). DOI: 10.1016/S0378-7788(99)00013-4/. (In Engl.)

2. Grabovyy P. Digitalization of the World Economy – a Factor in the Development of Society. In: *E3S Web of Conferences : Innovative Technologies in Environmental Science and Education*, ITESE 2019, Divnomorskoe Village, September 09–14. Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019, p. 04058. URL: https://www.researchgate.net/publication/337736126_Digitalization_of_the_world_economy_-_a_factor_in_the_development_of_society (Accessed 01/16/2023). DOI: 10.1051/e3sconf/201913504058.

3. Vlasov V.B., Mischenko V.Y., Gorbaneva E.P., Yemelianov D.I. Problems of Implementing of the Housing Renovation Program In Russian Federation. In: *European Proceedings*

of Social and Behavioural Sciences EpSBS. II International Conference on Economic and Social Trends for Sustainability of Modern Society, Krasnoyarsk, May 19–21, 2021. Krasnoyarsk, Russia : ISO London Limited – European Publisher, 2021, pp. 811–817. URL: https://www.europeanproceedings.com/files/data/article/10076/14994/article_10076_14994_pdf_100.pdf (Accessed 01/16/2023). DOI: 10.15405/epsbs.2021.09.02.92.

4. Mishchenko V.Ya., Gorbaneva E.P., Ovchinnikova E.V., Sevryukova K.S. Povyshenie energoeffektivnosti zhilykh zdaniy pri provedenii kapital'nogo remonta [Improving the Energy Efficiency of Residential Buildings during Capital Repair]. In: *FES: Finansy. Ekonomika. Strategiya* [FES: Finance. Economy. Strategy], 2019, Vol. 16, no. 1, pp. 66–72. (In Russ., abstr. in Engl.)

5. Dubova, Y.I. Information and Communication Technologies as a Modern Institute of Increase of Effectiveness of Marketing Activities in Russia. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 726, pp. 386–392 (2019). URL: https://www.researchgate.net/publication/281467794_Innovation_Ecosystems_A_Collaborative_Networks_Perspective (Accessed 01/16/2023). DOI:10.1007/978-3-319-90835-9_45. (In Engl.)

6. Abdrakhmanova G.I., Vishnevskii K.O., Volkova G.L. [et al.]. Indikatory tsifrovoi ekonomiki: 2018: statisticheskii sbornik [Indicators of the digital economy: 2018: statistical collection]. Moscow, HSE University Publ., 2018, 268 p. ISBN 978-5-7598-1770-3. DOI 10.17323/978-5-7598-1770-3. (In Russ.)

7. Sheina S.G., Petrov K.S., Fedorov A.A. Issledovanie etapov razvitiya BIM-tehnologii v mirovoi praktike i Rossii [Research of the Stages of Development Of BIM-Technologies IN World Practice and Russia]. In: *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'* [Construction and industrial safety], 2019, no. 14 (66), pp. 7–14. (In Russ., abstr. in Engl.)

8. Patrick X. W. Zou, Xiaoxiao Xu, Tim Mumford. Life-cycle building information modelling (BIM) engaged framework for improving building energy performance. In: *Energy and Buildings*, 2020, no. 231 (7), p. 110496. URL: https://www.researchgate.net/publication/346102711_Life-cycle_building_information_modelling_BIM_engaged_framework_for_improving_building_energy_performance (Accessed 01/16/2023). DOI:10.1016/j.enbuild.2020.110496. (In Engl.)

9. Volkov A.A., Giyasov B.I., Chelyshkov P.D. [et al.] Optimizatsiya arkhitektury i inzhenernogo obespecheniya sovremennykh zdaniy v tselyakh povysheniya ikh energeticheskoi effektivnosti [Architecture Optimization and Engineering of Modern Buildings to Improve Their Energy Efficiency]. In: *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2014, no. 6, pp. 111–113. (In Russ., abstr. in Engl.)

10. Fuller R. B. Geodesic dome. In: *Perspecta*, 1952, no. 1, pp. 30–33. (In Engl.)

11. Giyasov B.I. Tseva A.V. Vliyanie energoeffektivnosti zdaniy na ekologicheskii balans okruzhayushchei sredy [Influence of the Energy Efficiency of Buildings on the Ecological Balance of the Environment]. In: *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2015, no. 4, pp. 174–177. (In Russ., abstr. in Engl.)

12. Volkov A.A. Ierarkhii predstavleniya energeticheskikh sistem [Hierarchies of Description of Energy Systems]. In: *Vestnik MGSU*, 2013, no. 1, pp. 190–193. (In Russ., abstr. in Engl.)
13. Giyasov, B.I. Vliyanie razvitiya infrastruktury gorodov na zhilyu sredu [Hierarchies of Description of Energy Systems]. In: *Vestnik MGSU*, 2012, no. 4, pp. 17–21. (In Russ., abstr. in Engl.)
14. Savenok A.F., Savenok E.I. Osnovy ekologii i ratsional'nogo prirodopol'zovaniya : dlya uchrezhdenii, obespechivayushchikh poluchenie srednego spetsial'nogo obrazovaniya [Fundamentals of Ecology and Rational Nature Management]. Minsk, Ser-Vit Publ., 2004, 432 p. – ISBN 985-419-204-0: 7360.00. (In Russ.)
15. Gihan L. K. Garas, Hala G. El Kady, Ayman H. El Alf. Developing a New Combined Structural Roofing System of Domes and Vaults Supported by Cementitious Straw Bricks. In: *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2010, no. 4, pp. 44–55. URL: arprjournals.com/jeas/research_papers/rp_2010/jeas_0410_324.pdf. (In Engl.)
16. Mohammadjavad Mahdavinejad, Negar Badri, Maryam Fakhari, Mahya Haqshenas The Role of Domed Shape Roofs in Energy Loss at Night in Hot and Dry Climate (Case Study: Isfahan Historical Mosques Domes in Iran). In: *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2013, no. 6. URL: <http://pubs.sciepub.com/ajcea/1/6/1/> (In Engl.)
17. Pavlov G.N. Avtomatizatsiya arkhitekturno-stroitel'nogo proektirovaniya geodezicheskikh kupolov i obolochek [Automation of Architectural and Construction Design of Geodesic Domes and Shells], Doct. Techn. diss. Nizhnii Novgorod, 2007, 274 p.
18. Lakhov A.Ya. Razrabotka klassifikatsii geodezicheskikh kupolov [Building of Geodesic Domes Classification]. In: *Privolzhskii nauchnyi vestnik*, 2016, no. 1 (53), pp. 44–47. (In Russ.)
19. Donaldson S.E., Siegel S.G. Successful Software Development (2nd ed.). Upper Saddle River : Prentice Hall, Inc., 2001, 354 p. ISBN 0-13-086826-4. (In Engl.)
20. Polyanin A.D., Manzhurov A.V. Handbook of Mathematics for Engineers and Scientists. Chapman & Hall/CRC, 2007, 69 p. ISBN 9781584885023. (In Engl.)