

## Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: [www.unistroy.spb.ru](http://www.unistroy.spb.ru)



# Каменные сводчатые конструкции: история, классификация, применение

**С.А. Рябухина<sup>1</sup>**

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.*

Информация о статье	История	Ключевые слова
УДК 692.44 Научная статья	Подана в редакцию 19 апреля 2015 Принята 12 июня 2015	свод, сводчатая конструкция, классификация сводов, каменный свод, сводчатое перекрытие

### АННОТАЦИЯ

Существующая статья «Сводчатые конструкции исторических зданий» в журнале «Строительство уникальных зданий и сооружений» заинтересовала меня темой сводчатых конструкций. Они проектируются и используются человечеством еще с античных времен, однако до сих пор не разработаны критерии их прочности и устойчивости, а существующие методы их расчета сильно приблизительны. Также меня привлекло многообразие видов и форм сводчатых конструкций. Именно эти причины побудили меня развить предложенную авторами тему и дополнить классификацию данного типа конструкций. Мною были изучены различные материалы и составлена более подробная классификация сводчатых конструкций во всем их многообразии

### Содержание

1. Введение	88
2. Обзор отечественной и зарубежной литературы	88
3. Классификация каменных сводчатых конструкций	88
4. Вывод	93

1

*Контактный автор:*  
+7 (921) 751 2524, [sveta\\_ryabukhina@mail.ru](mailto:sveta_ryabukhina@mail.ru) (Рябухина Светлана Андреевна, студент)

## 1. Введение

Можно предположить, что прообразом арок и сводов мог быть камень природной формы с выпуклой снизу поверхностью, перекрывающей целиком пространство между опорами [5].

Примеры из истории строительного искусства говорят об использовании сводчатых конструкций различными народами с глубокой древности: вырубленный из цельного камня купол на гробнице Теодориха в Равенне диаметром более 20 метров, покрытие сокровищницы Атрея в Микенах диаметром около 14 метров в виде конусообразного свода, развалинах древних египетских жилых построек оказались следы правильно сложенных не только цилиндрических, но и эллиптических сводов пролетом более 3 метров, устроенных от 700 до 1500 лет до н. э. и другие [5, 12].

Но только в эпоху расцвета Рима возведение сводов стало массовым и охватило все области строительства [10].

С древних времен на Руси в жилищном строительстве все чаще стали применяться различного вида цилиндрические своды. С середины XVI века - в каменных подклетах городских деревянных домов, с начала XVII века - в качестве перекрытий и покрытий каменных палат [2].

## 2. Обзор отечественной и зарубежной литературы

Сведения о сводчатых конструкциях, начиная с арок, систематизировались и передавались из поколения в поколение еще с древних времен: Месопотамия, Египет, Рим [5, 6, 16, 21]. Однако абсолютно полных и точных результатов исследования напряжений и расчета конструкций не достигнуто и по сей день. Лишь с помощью специальных расчетных комплексов люди способны определить внутренние усилия в сводах [12, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 24].

В России над сводчатыми конструкциями усердно работал в конце XIX – начале XX века Лахтин Н.К.. Его труды и сегодня дают наиболее полную характеристику и классификацию сводов, хотя расчеты приводятся достаточно приблизительные [1, 4, 27]. К середине XX века изучение сводов и арок достигло невероятных высот с архитектурной точки зрения. Их изысканные очертания вдохновляли как зарубежных, так и советских ученых [2, 8, 9, 11].

С возникновением специализированной техники для исследования и расчетов сводчатых конструкций стало возможным наиболее точно спрогнозировать деформации и разрушения конструкций [13, 14, 23], а также инновационных методов обследования и усиления каменных сводов [25, 26].

## 3. Классификация каменных сводчатых конструкций

На протяжении многовекового возведения сводчатых конструкций перекрытий и покрытий в гражданском и культовом строительстве складывалась их типология [3]. В общем случае каменные своды классифицированы по образующим очертания их поверхности на

- 1) цилиндрические, имеющие образующими прямые линии;
- 2) сферические или своды двоякой кривизны, имеющие образующими кривые линии [4, 11].

Наибольшее распространение в застройках Санкт-Петербурга в XIX веке получили цилиндрические своды с циркульной формой их образующих [9].

В свою очередь цилиндрические своды подразделяются следующим образом.

1. Собственно цилиндрические: полные полуциркульные, сжатые (лучковые) пологие, сжатые (лучковые) плоские, плоские или перемычки, коробовые, овальные, овоидальные, бочарные, эллиптические, параболические, ползучие (косуля), стрельчатые, сходящиеся, кольцевые, конические, винтовые, сложные [4].

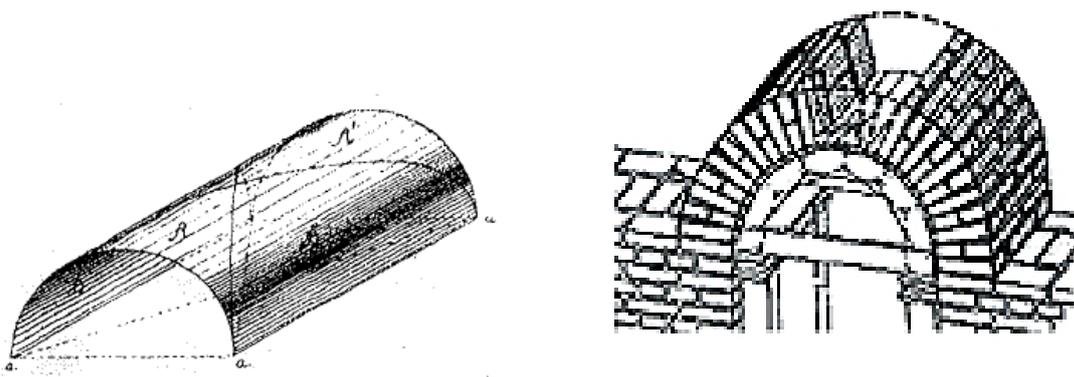
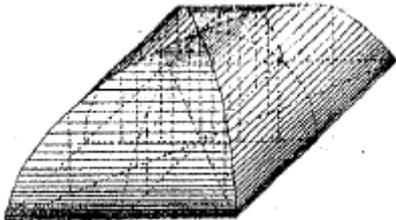
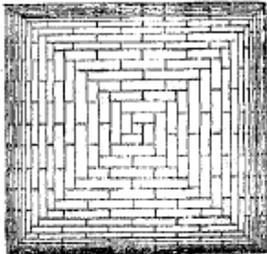


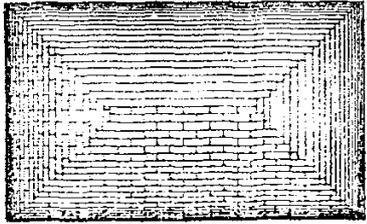
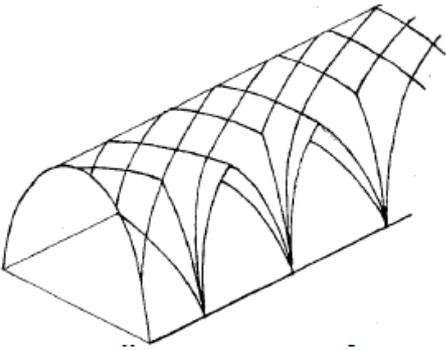
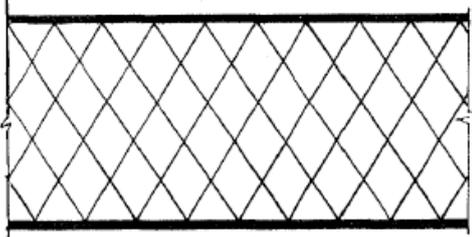
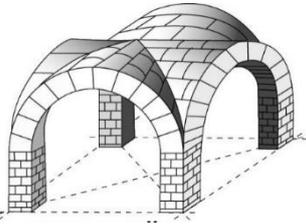
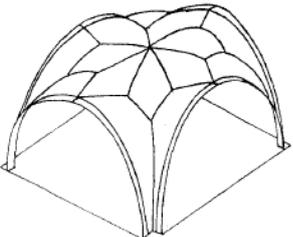
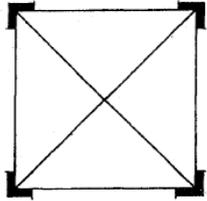
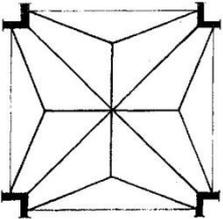
Рисунок 1. Цилиндрический свод [1, 6]

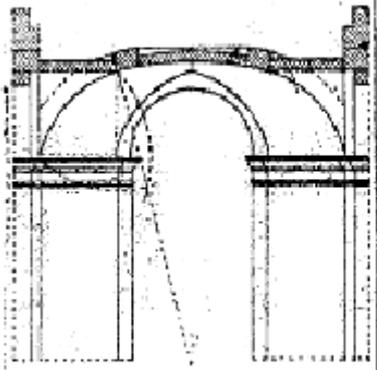
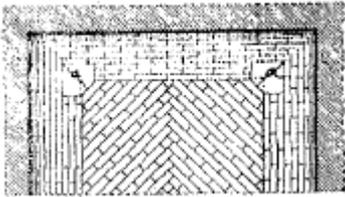
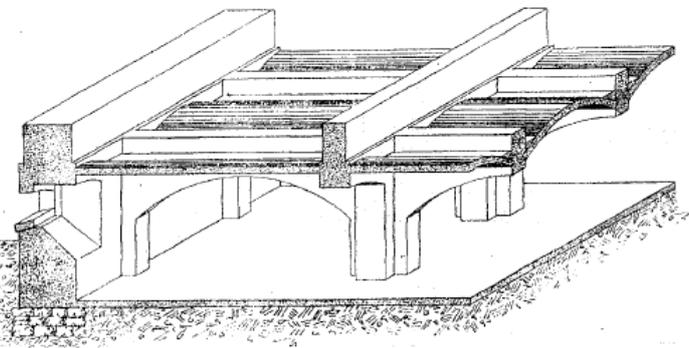
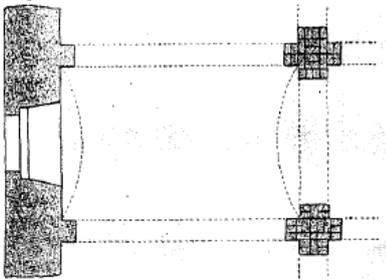
2. Сомкнутые (монастырские своды): лотковые, зеркальные, крестовые, готические крестовые на нервюрах; звёздчатые; сетчатые; веерные, иезуитские, сложные (пруссские) [4].

Пяты цилиндрических сводов с большой пологостью глубоко вдаются в перекрытое ими пространство, поэтому освещение его производится, как правило, окнами, расположенными в щечковых стенах. Размещение окон в опорных стенах невыгодно, потому что этим уменьшалась устойчивость опор. Пологие цилиндрические своды стесняли свободное пространство, низко опуская пяты в помещение и затрудняли освещение помещений, поэтому вместо них часто использовались прусские, или сложные своды [5].

Таблица 1. Классификация цилиндрических сводов

Общий вид	Вид сверху, наименование
	<p>Сомкнутый свод [1]</p> 
	<p>Бочарный свод [1]</p>

	
	<p>Сетчатый свод с распалубкой [1]</p> 
 	 <p>Крестовый свод [10, 1]</p>  <p>Крестовый свод с нервюрами [1]</p>

	<p>Зеркальный свод с кирпичным зеркалом [1]</p> 
	<p>Прусский свод [1]</p> 

Сомкнутые, или котельные, или монастырские своды образуются разделением полуциркульного цилиндрического свода диагональными плоскостями на два лотка и две распалубки с использованием в качестве образующих только лотков (см. рисунок 1). Число опорных стен может быть произвольным, но не менее трех.

Крестовые своды, или перекрестные, или стрельчатые, состоят только из распалубок и передают усилия на отдельные опоры. Крестовыми сводами перекрывали квадратные или прямоугольные помещения с соотношениями сторон не более 2:1.

Таблица 2. Система кирпичной кладки в крестовых сводах

Пролет свода, м	Кладка в распалубках, кирпичи в шт.	Кладка в диагональных ребрах, кирпичи в шт.
		толщина x ширина
3 – 4,5	1,5	1x1
4,5 – 7,75	1	(1,5 – 2) x (1,5 – 2)
7,75 – 10	1	(2 – 2,5) x (2 – 2,5)

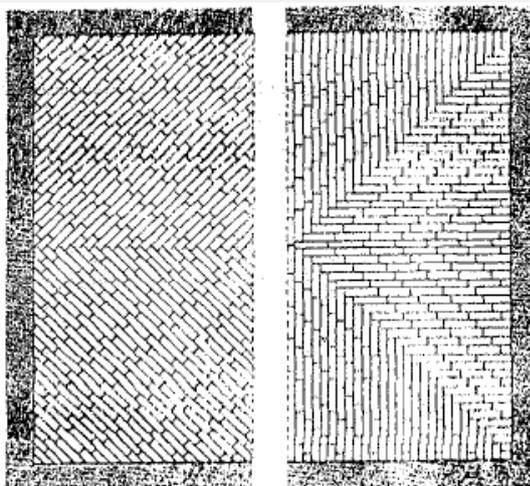


Рисунок 1. Кладка крестового свода [1]

Для производства кладки крестового свода без утолщения диагональных ребер применялась полная опалубка. Кладка распалубок производилась или рядами, параллельными к их оси, или перпендикулярно к диагональным ребрам. Кладка сводов начиналась с диагональных ребер.

Зеркальные своды получают путем отсечения верхней части лоткового свода горизонтальной плоскостью и заменой её на почти плоское сводчатое покрытие – зеркало со стрелой подъема в  $1/36$  от его пролета. Поддугами называются отсеченные части лоткового свода. Зеркало отделялось от поддуг сложным карнизом и часто служило для устройства верхнего освещения. С этими же целями в поддугах нередко устраивали непрерывный ряд распалубок.

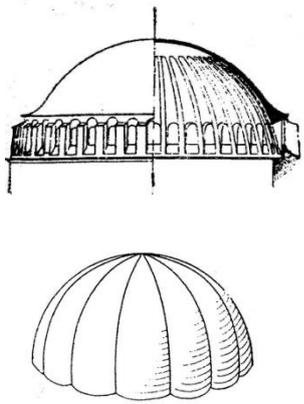
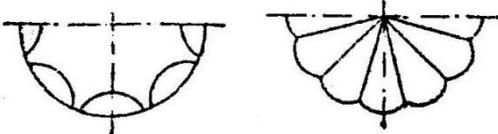
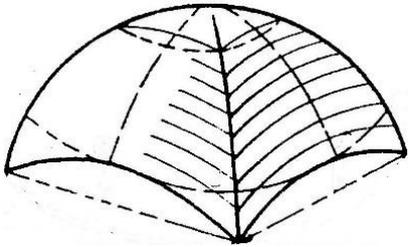
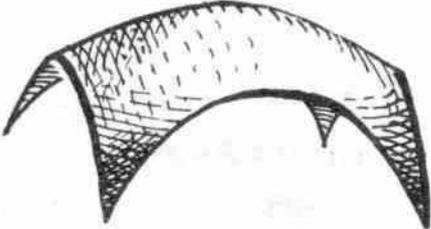
На зеркальные своды не воздействовали никакие нагрузки, они несли только собственный вес. Полезная нагрузка от вышележащего этажа приходилась на отдельное перекрытие. Благодаря этому зеркало становилось независимой конструкцией, что позволяло лучше поддерживать состояние ценной отделки потолка - лепнины, живописных плафонов.

Сложные, или прусские, своды представляют собой плоские цилиндрические своды. Их располагают между металлическими балками или подпружными рамами, которые разделяют прямоугольное пространство на части меньшей величины. Подпружные рамы и металлические балки выполняют функцию опор, а оси прусских сводов перпендикулярны несущим стенам. Таким образом, получается своего рода аркада вместо сплошной продольной несущей внутренней стены. Освещение пространства происходит за счет окон в щечковой стене, при этом отсутствует необходимость устройства распалубок [5].

**Сферические** своды подразделяются на

- купольные – совершенная архитектурная форма купола является наилучшей статической пространственной системой, создающей полное единство внешнего объема здания и ее внутреннего пространства[8];
- парусные (полные, плоские – богемские);
- бочарные [4].

Таблица 3. Классификация сферических сводов

Общий вид	Вид сверху, наименование
	 Купольный свод (с распалубками) [8]
	Парусный свод [8]
	Бочарный свод [7]

Существует классификация, характеризующая и стрелу подъема свода. Своды с подъемом больше  $1/2b$  ( $b$  — пролёт), назывались возвышенными, меньше  $1/2b$  - сжатыми [1,3].

#### 4. Вывод

На современном этапе развития строительства больших городов архитектурные формы в виде сводов и арок не только придают приятный эстетический вид зданиям и сооружениям, но также применение сводчатых конструкций позволяет снизить до минимума армирование конструкций и обеспечивающих "гибкость" формы и параметров жилища.

Исторический опыт возведения сводчатых конструкций в культовом зодчестве и в жилищном строительстве полностью доказывает оправданность технологическую сложность их возведения. На протяжении многих веков основные помещения жилища у многих народов перекрывались конструкциями, имеющими отличную от плоскости форму. Причиной тому является конструктивный принцип сущности сводов (внешняя оболочка зачастую и есть внутреннее покрытие помещения), но и в той символической смысловой нагрузке, которую призвано было нести форма покрытия главного помещения в доме [5].

## Литература

- [1]. Третьякова Е.Г. Архитектурно-строительные системы малоэтажного жилища со сводчатыми конструкциями. СПб. 2000. 197 с.
- [1]. Ушаков Ю.С., Мильчук М.И. Деревянная архитектура Русского севера. Страницы истории Л.: 1981. 121 с.
- [2]. Berggard V.R. Гражданская архитектура. Арки и своды. СПб. 1897-1898. 226 с.
- [3]. Лахтин Н.К. Расчет арок и сводов М.: 1911. 468 с.
- [4]. Всеобщая история архитектуры V 12t. М., t.1, 1970; t.2, 1973; t.3, 1966; t.4, 1966, t.5, 1967; t.6, 1968; t.7, 1972; t.8, 1973; t.9, kn. pervaya, 1975.
- [5]. Mark Sartan Romanskaya bazilika [Romanesque basilica] // Iskusstvo.2008. №11. [Elektronnyj resurs]. URL: <http://art.1september.ru/article.php?ID=200801103> (дата обращения: 11.04.2015).
- [6]. Yandex electronic dictionary [web source]. URL: <https://m.slovari.yandex.ua/article.xml?book=pluzhnik>. (дата обрщения: 11.04.2015).
- [7]. Кузнецов А.В. Своды и их декор. М., 2003, 420 с.
- [8]. Kirshtejn G. Stroitelnoe iskusstvo. Rukovodstvo k vozvedeniyu fabriчных, grazhdanskix i selskix stroenij. [The art of building. Guide to the construction of the factory, civil and rural buildings]. Riga.: Izdanie Kimmelya., 1915. - 548 s. (rus)
- [9]. Чаплицкая В. Основная проблема экологии жилища. Жилищное строительство, 1992. №5. С.5-6. (rus)
- [10]. Розенблюмас А.М. Каменные конструкции. М., 1964. 304 с.
- [11]. Block P, Ciblac T, Ochsendorf J. (2006). Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings. Computers & Structures. 2006. No. 84(29–30), pp. 1841-1852.
- [12]. Dahmen J.F.D., Ochsendorfs J.A. (2012). 17 - Earth masonry structures: arches, vaults and domes. Modern Earth Buildings. 2012. Pp. 427-460.
- [13]. Kamal O.A., Hamdy G.A., El-Salakawy T.S. (2014). Nonlinear analysis of historic and contemporary vaulted masonry assemblages. HBRC Journal. 2014. No.10(3), pp. 235-246.
- [14]. Block P., Lachauer L. (2014). Three-dimensional funicular analysis of masonry vaults. Mechanics Research Communications. 2014. No. 56, pp 53-60.
- [15]. Salam M.E.A EL (2002). Construction of underground works and tunnels in ancient Egypt. Tunnelling and Underground Space Technology. 2002. No. 17(3), pp. 295-304.
- [16]. Pottmann H., Eigensatz M., Vaxman A., Wallner J. (2015). Architectural geometry. Computers & Graphics. 2015. No. 47, pp. 145-164.
- [17]. Anania L., Badalà A., D'Agata G. (2013). The post strengthening of the masonry vaults by the  $\Omega$ -Wrap technique based on the use of C-FRP. Construction and Building Materials. 2013. No. 47, pp. 1053-1068 .
- [18]. Milani G.(2015). Upper bound sequential linear programming mesh adaptation scheme for collapse analysis of masonry vaults. Advances in Engineering Software. 2015. No. 79, pp 91-110.
- [19]. Cakir F., Uysal H. (2014). Experimental modal analysis of brick masonry arches strengthened prepreg composites. Journal of Cultural Heritage, In Press, Corrected Proof, Available online. 3 July 2014.
- [20]. Fiumi L. (2012). Surveying the roofs of Rome. Journal of Cultural Heritage. 2012. No.13(3), pp. 304-313.
- [21]. Rizzi E., Rusconi F., Cocchetti G. (2014). Analytical and numerical DDA analysis on the collapse mode of circular masonry arches. Engineering Structures. 2014. No. 60, pp. 241-257.
- [22]. Natalini M.B., Morel C., Natalini B. (2013). Mean loads on vaulted canopy roofs. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2013. No. 119, pp. 102-113.
- [23]. López-Almansa F., Sarrablo V., Lourenço P.B., Barros J.A.O., Roca P., da Porto F., Modena C. (2010). Reinforced brick masonry light vaults: Semi-prefabrication, construction, testing and numerical modeling. Construction and Building Materials. 2010. No. 24(10), pp. 1799-1814.
- [24]. Çalık İ., Bayraktar A., Türker T., Karadeniz H. (2014). Structural dynamic identification of a damaged and restored masonry vault using Ambient Vibrations. Measurement. 2014. No.55, pp 462-472 .
- [25]. Roca P., López-Almansa F., Miquel J., Hanganu A. (2007). Limit analysis of reinforced masonry vaults. Engineering Structures. 2007. No. 29(3), pp. 431-439.
- [26]. Зимин С.С., Кокоткова О.Д., Беспалов В.В. Сводчатые конструкции исторических зданий. Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 2(29). С. 57-72.

## Stone vaulted structures: history, classification, application

S.A. Riabuhina <sup>1</sup>

*St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-nd Krasnoarmeiskaya St. 4, 190005 St. Petersburg, Russia.*

---

### ARTICLE INFO

Technical paper

### Article history

Received 19 April 2015  
Accepted 12 June 2015

### Keywords

vault,  
vaulted structure,  
classification vaults,  
stone arch,  
vaulted ceiling

---

### ABSTRACT

The existing article "Vaulted construction of historic buildings" in the magazine "Construction of unique buildings and structures" made me interested in vaulted structures topic. They are designed and used by mankind since ancient times, but there are still no developed criteria for their strength and stability, and existing calculation methods are very approximate. Besides, I was attracted by the the variety of types and shapes of vaulted structures. These reasons led me to develop the theme proposed by the author and complement the classification of this type of structures. I have studied variable materials and compiled a detailed classification of the vaulted structures in all their diversity.

---

<sup>1</sup>

*Corresponding author:*  
+7 (921) 751 2524, sveta\_ryabukhina@mail.ru (Riabuhina Svetlana Andreevna, Student)

## References

- [1]. Tretyakova E.G. *Arhitekturno-stroitelnye sistemy malometazhnogo zhilishha so svodchatymi konstruktsiyami*. [Architectural construction systems of low-rise homes with vaulted structures] SPb.: 2000. 197 p. (rus)
- [2]. Ushakov Yu.S., Milchik M.I. *Derevyannaya arhitektura russkogo Severa. Stranicy istorii*. [Wooden Architecture of the Russian North. Pages of history] L.: 1981. 121s. (rus)
- [3]. Bergard V.R. *Grazhdanskaya arhitektura. Arki i svody. SPb., izd. student. V. Kunderta*. [Civil architecture. Arches and vaults] 1897-1898. 226s. (rus)
- [4]. Laxtin N.K., *Raschyot arok i svodov* [Calculation of arches and vaults] M.: 1911. 468s. (rus)
- [5]. Vseobshchaya istoriya arhitektury. [General History of Architecture] V 12t. M., t.1, 1970; t.2, 1973; t.3, 1966; t.4, 1966, t.5, 1967; t.6, 1968; t.7, 1972; t.8, 1973; t.9, kn. pervaya, 1975. (rus)
- [6]. *Mark Sartan Romanskaya bazilika* [Romanesque basilica] // *Iskusstvo*. 2008. №11. [web source]. URL: <http://art.1september.ru/article.php?ID=200801103> (data obrashheniya: 11.04.2015).
- [7]. *Elektronnyy yandeks-slovar*. [Yandex electronic dictionary] [web source]. URL: <https://m.slovari.yandex.ua/article.xml?book=pluzhnik...> (data obrashheniya: 11.04.2015). (rus)
- [8]. Kuznecov A.V. *Svody i ix dekor*. [Vaults and their décor] M., 2003, 420 p. (rus)
- [9]. Kirshtejn G. *Stroitelnoe iskusstvo. Rukovodstvo k vozvedeniyu fabrichnyx, grazhdanskix i selskix stroenij*. [The art of building. Guide to the construction of the factory, civil and rural buildings]. Riga.: Izdanie Kimmelya., 1915. - 548 s., 168 tabl. (rus)
- [10]. Chaplickaya V. *Osnovnaya problema ekologii zhilishha*. [The main problem of ecology homes] *Zhilishhnoe stroitelstvo*, 1992. Vol. 5. Pp. 5-6. (rus)
- [11]. Rozenblyumas A.M. *Kamennye konstrukcii*. [The stone structures] M.: Izdatelstvo «Vysshaya shkola». 1964. 304 p.
- [12]. Block P, Ciblac T, Ochsendorf J. (2006). Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings. *Computers & Structures*. 2006. No. 84(29–30), pp. 1841-1852.
- [13]. Dahmen J.F.D., Ochsendorf J.A. (2012). 17 - Earth masonry structures: arches, vaults and domes. *Modern Earth Buildings*. 2012. Pp. 427-460.
- [14]. Kamal O.A., Hamdy G.A., El-Salakawy T.S. (2014). Nonlinear analysis of historic and contemporary vaulted masonry assemblages. *HBRC Journal*. 2014. No.10(3), pp. 235-246.
- [15]. Block P., Lachauer L. (2014). Three-dimensional funicular analysis of masonry vaults. *Mechanics Research Communications*. 2014. No. 56, pp 53-60.
- [16]. Salam M.E.A EL (2002). Construction of underground works and tunnels in ancient Egypt. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2002. No. 17(3), pp. 295-304.
- [17]. Pottmann H., Eigensatz M., Vaxman A., Wallner J. (2015). Architectural geometry. *Computers & Graphics*. 2015. No. 47, pp. 145-164.
- [18]. Anania L., Badalà A., D'Agata G. (2013). The post strengthening of the masonry vaults by the  $\Omega$ -Wrap technique based on the use of C-FRP. *Construction and Building Materials*. 2013. No. 47, pp. 1053-1068.
- [19]. Milani G. (2015). Upper bound sequential linear programming mesh adaptation scheme for collapse analysis of masonry vaults. *Advances in Engineering Software*. 2015. No. 79, pp 91-110.
- [20]. Cakir F., Uysal H. (2014). Experimental modal analysis of brick masonry arches strengthened prepreg composites. *Journal of Cultural Heritage*, In Press, Corrected Proof, Available online. 3 July 2014.
- [21]. Fiumi L. (2012). Surveying the roofs of Rome. *Journal of Cultural Heritage*. 2012. No.13(3), pp. 304-313.
- [22]. Rizzi E., Rusconi F., Cocchetti G. (2014). Analytical and numerical DDA analysis on the collapse mode of circular masonry arches. *Engineering Structures*. 2014. No. 60, pp. 241-257.
- [23]. Natalini M.B., Morel C., Natalini B. (2013). Mean loads on vaulted canopy roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013. No. 119, pp. 102-113.
- [24]. López-Almansa F., Sarrablo V., Lourenço P.B., Barros J.A.O., Roca P., da Porto F., Modena C. (2010). Reinforced brick masonry light vaults: Semi-prefabrication, construction, testing and numerical modeling. *Construction and Building Materials*. 2010. No. 24(10), pp. 1799-1814.

- [25]. Çalık İ., Bayraktar A., Türker T., Karadeniz H. (2014). Structural dynamic identification of a damaged and restored masonry vault using Ambient Vibrations. Measurement. 2014. No.55, pp 462-472 .
- [26]. Roca P., López-Almansa F., Miquel J., Hanganu A.. (2007). Limit analysis of reinforced masonry vaults. Engineering Structures. 2007. No. 29(3), pp. 431-439.
- [27]. Zimin S.S. Kokotkova O.D., Bepalov V.V. (2015). *Svodchatye konstrukcii istoricheskix zdaniij*. [Vaulted construction of historic buildings]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2015. No. 2(29), pp. 57-72. (rus)

*Рябухина С.А. Каменные сводчатые конструкции: история, классификация, применение // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №6(33). С. 87-97.*

*Riabuhina S.A. Stone vaulted structures: history, classification, application. Construction of Unique Buildings and Structures, 2015, 6(33), Pp. 87-97. (rus)*