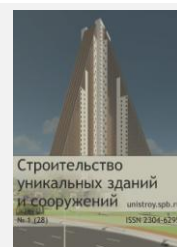




Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spb.ru



Сводчатые конструкции исторических зданий

С.С. Зимин¹, О.Д. Кокоткова², В.В. Беспалов³

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет», 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Информация о статье

УДК 693.21

Аналитический обзор

История

Подана в редакцию 15 ноября 2014
Принята 23 декабря 2014

Ключевые слова

каменный свод,
арка,
исторические здания,
конструктивная схема,
анализ

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены основные разновидности сводчатых конструкций зданий, возведенных в период до XX века. Проанализированы история исследования конструктивных особенностей сводов и текущее состояние их изученности.

По результатам анализа можно сделать следующие выводы:

- 1) В настоящее время, несмотря на технологический прогресс, до сих пор не найден закон распределения напряжений в теле свода и не разработаны критерии прочности и устойчивости;
- 2) В России сейчас почти нет исследователей, которые бы углубленно занимались этим вопросом;
- 3) Наиболее распространенным на сегодняшний день способом приближенного расчета сводчатых конструкций является использование программно-вычислительных комплексов, учитывающих нелинейность и анизотропность этих структур, например ANSYS или SOFiSTiK. На примере Главного здания Санкт-Петербургского политехнического университета показано многообразие конструкций сводов, их комбинаций и способов соединения. Обоснована необходимость углубленных исследований работы сводчатых конструкций.

Содержание

1.	Введение	58
2.	Обзор зарубежной и отечественной литературы	58
3.	Классификация сводчатых конструкций	59
4.	Сводчатые системы главного корпуса СПбПУ	60
5.	Заключение	62

³

Контактный автор:

+7 (911) 196 8803, kokotkova0308@me.com (Кокоткова Оксана Дмитриевна, студент)

¹

+7 (921) 347 7701, zimin_sergei@mail.ru (Зимин Сергей Сергеевич, старший преподаватель)

²

+7 (981) 785 0899, chanchullero@yandex.ru (Беспалов Владимир Владимирович, студент)

1. Введение

Исторически, с древних времен и вплоть до начала XX века, параллельно существовали две основные конструктивные схемы строительных конструкций – стоечно-балочная (выполнялась из дерева или камня) и стоечно-арочная (выполнялась преимущественно из камня). В начале XX века конструктивные схемы «переоделлись» в сталь и железобетон.

При этом стоечно-балочная система вплоть до наших дней, по сути, практически не менялась и оставалась предельно простой (стойки плюс балки), в то время как арка постоянно эволюционировала, и из нее вырастали сложные сводчатые системы и множество их комбинаций, в том числе купола.

Стоит отметить, что расчет стоечно-балочных систем хорошо изучен и описан, в то время как сводчатые каменные конструкции до сих пор мало исследованы, а специализированная литература по их расчету практически отсутствует. Вплоть до XIX века сводчатые конструкции возводились, как правило, с большим запасом несущей способности по правилам и определенным геометрическим соотношениям, заложенным еще в античности.

Развитие в XIX в. точных наук, сопротивления материалов, строительной механики и пр. нашли свое применение при расчете конструкций, выполняемых, прежде всего, из новых материалов. Считалось, что каменные своды, во первых «устарели», а во вторых, могли строиться по старинке и с учетом накопленного опыта.

Первые глубокие исследования распорных каменных систем появились только во второй половине XIX – начале XX века [2, 47, 48]. Однако каменные своды в них анализировались на основе общих моделей, разработанных для упругих стержней и оболочек, то есть без учета специфики работы именно каменных конструкций.

В XX в., а особенно во второй его половине, эстафета каменными конструкциями была полностью передана стальным и железобетонным, что заставило каменные своды полностью отойти в тень.

Сводчатые каменные конструкции широко применялись и в Санкт-Петербурге непосредственно со времени основания города и вплоть до начала XX вв. Стоит отметить, что сводчатые конструкции активно использовались и при послевоенном восстановлении города [1].

В настоящее время в Санкт-Петербурге и по всей России проводится как ремонт и реставрация исторических зданий, так и их модернизация, в результате которой часто возникает необходимость устройства, например, лифтовых и вентиляционных шахт, других технологических проемов, которые пронизывают перекрытия, в том числе каменные своды. В связи с этим возникает необходимость в расчетных обоснованиях последних, что возможно только при понимании работы и специфики каменных сводов.

В работе показано многообразие сводчатых конструкций на примере Главного Здания Санкт-Петербургского Политехнического Университета.

2. Обзор зарубежной и отечественной литературы

Первые попытки систематизировать накопленный эмпирический опыт возведения сводов появляются в Европе в эпоху Возрождения, одновременно с широким распространением книгопечатания. Так например, французский архитектор Philibert de l'Orme подробно описывал технологию кладки арок и сводов и особенности использования нервюрного каркаса [7]. Однако тексты того времени являлись в большей степени практическим руководством.

Работы, посвященные специфике работы сводчатых конструкций, начинают появляться только в конце XIX века. В частности, в России этой проблемой занимался Н. К. Лахтин. В его работе Расчет арок и сводов [2] (1910) он собрал и систематизировал весь имевшийся на тот момент материал, составил руководство по аналитическому и графическому расчету арочных и сводчатых перекрытий. Несмотря на большой вклад в теорию расчета сводов, Н. К. Лахтин отмечал, что закон распределения напряжений в теле свода до сих пор не найден, а расчеты могут проводиться лишь с использованием ряда упрощений.

Это утверждение справедливо и в наши дни. К сожалению, в России к настоящему моменту почти нет исследователей, занимающихся этим вопросом достаточно углубленно. Большинство публикаций посвящено либо художественно-декоративным аспектам сводов, либо анализу практического опыта их возведения и реставрации [3, 6, 49-64].

Анализ зарубежных публикаций [15-46, 65-78] показывает, что в большинстве случаев для расчета применяются различные программно-вычислительные комплексы, такие как ANSYS, SOFiStiK и их

аналоги, которые позволяют с определенной точностью показать распределение напряжений в действующей конструкции. Однако критерии прочности и устойчивости сводов не разработаны. Кроме того, требуется индивидуальный подход к каждому своду, из-за различий в материалах и способах кладки.

Несколько больше изучены каменные арки [79-92]. Это объясняется как их простотой, так и необходимостью ясного понимания работы конструкции каменных мостов, по которым организовано движение автомобильного и железнодорожного транспорта.

Сегодня один из основных исследователей, изучающих расчет и анализ кладки сводчатых конструкций, - G. Milani. В его работах [8-14] с использованием программных расчетных комплексов проанализировано поведение кладки сводов, куполов и арок в различных случаях, разработаны методы прогнозирования разрушающей нагрузки для сводчатых конструкций, представлены различные модели определения напряжений в них.

3. Классификация сводчатых конструкций

Существующие на сегодняшний день сводчатые конструкции можно условно разделить на две группы: своды, имеющие кладочную структуру, которые в большинстве были возведены до начала XX века, и сетчатые сводчатые конструкции из различных материалов – такие конструкции широко используются уже в современном строительстве. Рассмотрим подробнее первую группу.

Наиболее простыми здесь являются цилиндрические своды (см. рисунок 1). Они передают все свое давление и распор на опорные стены. Рабочая схема такого свода представляет собой систему независимых параллельных арок. Если нагрузка вдоль свода меняется ступенчато или используются подпружные арки, то каждой ступени нагрузки или сечения соответствует своя элементарная арка, являющаяся отдельным деформируемым блоком [5]. Если при взаимном пересечении двух цилиндрических сводов одинаковой высоты отбросить внутренние вырезки, оставшиеся наружные части образуют крестовый свод (см. рисунок 2, а). Его рабочая модель – система элементарных арок, передающих давление и распор на диагональные ребра. Они испытывают вертикальное давление и растягивающую диагональ горизонтальную нагрузку, нарастающие к основанию. В результате обжатие диагонального ребра очень большое в основании и очень малое на вершине. Это – характерная черта крестовых сводов, вследствие чего они не способны нести сосредоточенные центральные нагрузки.

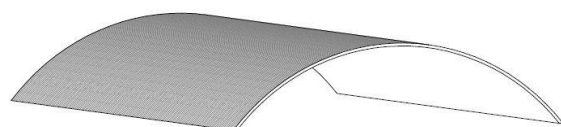


Рисунок 1. Простой цилиндрический свод

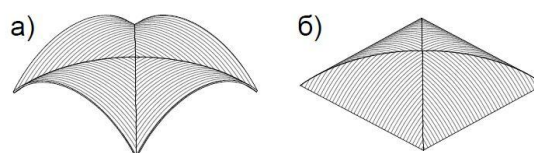


Рисунок 2. а) Крестовый свод; б) Сомкнутый свод

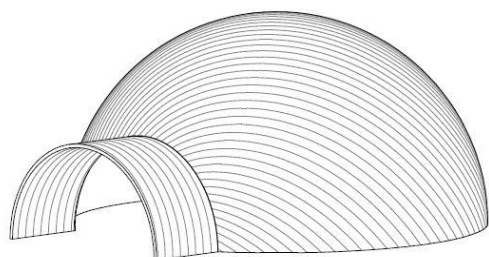


Рисунок 3. Купольный свод с распалубкой

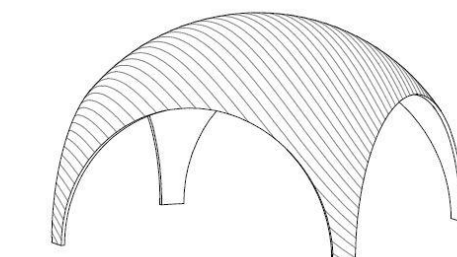


Рисунок 4. Парусный свод

Для таких нагрузок обычно используют сомкнутые своды. Такой свод можно получить, если взять части, лежащие внутри линии пересечения цилиндрических сводов (см. рисунок 2, б). Его элементарные полуарки передают распор в условные диагональные ребра, а при наличии центрального светового барабана – и в его опорное кольцо. Нижней опорой они передают распор и грузовое давление в опорный контур свода, что затрудняет устройство проемов в нем, возникает необходимость использования распалубок. Распалубки образуются при пересечении малых по высоте и отверстию цилиндрических сводов с большими (см. рисунок 3), как правило - цилиндрическими или сомкнутыми, реже - купольными. Купольный свод составляется из клинообразных камней, укладываемых горизонтальными кольцами.

Каждое такое кольцо замыкается последним камнем и является самонесущим, что используется при устройстве барабана – цилиндрической части, устанавливаемой над последним кольцом купола. В барабане устраиваются отверстия для освещения, и он так же в свою очередь перекрывается небольшим куполом [4]. В случае, когда купол перекрывает квадратное помещение, образуется парусный свод (см. рисунок 4). Давление и распор парусного, как и купольного свода, передается на всю длину опорных стен, либо на опорные пилоны посредством арок.

4. Сводчатые системы главного корпуса Санкт-Петербургского политехнического университета

Здание имеет довольно сложную систему сводчатых переходов и способов опирания. Так, в вестибюле реализована система балдахина (см. рисунок 5) с 3 рядами крестовых сводов, опирающихся на колонны. Своды среднего ряда «растянуты» и образуют прямоугольники в плане (см. рисунок 6). К переднему ряду примыкают распалубки, выходящие на фасад, в виде цилиндрических сводов.

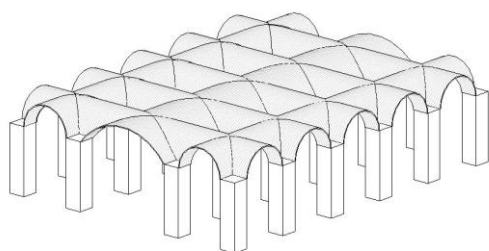


Рисунок 5. Система балдахина: только нагруженные колонны, без стен и декоративных колонн



Рисунок 6. Вестибюль главного корпуса



Рисунок 9. Белый зал. Сомкнутый свод на распалубках



Рисунок 10. Сводчатый потолок большой физической аудитории

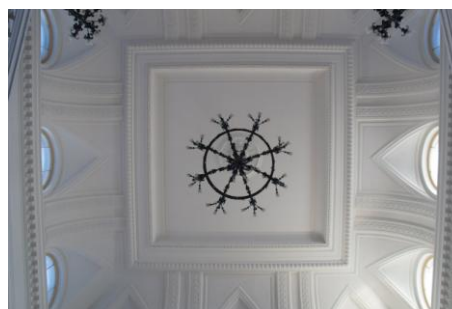


Рисунок 11. Сомкнутый свод над главной лестницей



Последний ряд примыкает непосредственно к коридору первого этажа с равносторонними крестовыми сводами, поделенному на секции подпружными арками (см. рисунок 7). Фасадная стена специально выполнена утолщенной (см. рисунок 8): она воспринимает распор и давление не только от сводов первого этажа, но и через сомкнутый свод над белым залом воспринимает нагрузку от крыши.

В белом зале, над главной лестницей, в большой физической аудитории и других лекционных второго этажа использованы сомкнутые своды с плафонами различной формы (см. рисунки 9-11).

Распалубки под окна расположены между несущими ребрами, на которые разделен весь главный корпус. Начиная от колонн второго этажа, они переходят на первый и далее – в подвал на массивные подпружные арки (см. рисунки 12, 13). Цилиндрические своды цокольного этажа обладают очень малым подъемом, что позволяет минимизировать вертикальные нагрузки.

В помещении физической лаборатории цепь сводов на распалубках проходит вокруг двух массивных опорных колонн (см. рисунок 14).

Рисунок 12. Вид с главной лестницы

Наконец, читальный зал библиотеки завершает абсида с полукуполом в торце и конструкция, представляющая собой парусный свод с четырьмя арками, над которыми возведен световой барабан и завершающий купол (см. рисунок 15, 16). Из-за большого объема вырезанных участков, сделать предположение об изначальной форме свода можно лишь по угловым ребрам над колоннами.



Рисунок 13. Цилиндрический свод и подпружные арки цокольного этажа



Рисунок 14. Физическая лаборатория



Рисунок 15. Читальный зал, вид на абсиду с полукуполом



Рисунок 16. Читальный зал, вид на световой барабан и купол

5. Заключение

Крайне важно учитывать все характерные особенности кладочной структуры при расчете арочно-сводчатых конструкций исторических зданий. С течением времени всё более возрастает необходимость в восстановлении поврежденных и изнашивающихся памятников архитектурного наследия, в некоторых случаях – в их реконструкции и модернизации.

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время, несмотря на технологический прогресс, до сих пор не найден закон распределения напряжений в теле свода и не разработаны критерии прочности и устойчивости.
2. В России сейчас почти нет исследователей, которые бы углубленно занимались этим вопросом.
3. Наиболее распространенным на сегодняшний день способом приближенного расчета сводчатых конструкций является использование программно-вычислительных комплексов, учитывающих нелинейность и анизотропность этих структур, например ANSYS или SOFiSTiK.
4. На примере главного корпуса СПбПУ можно видеть, что даже в одном здании могут присутствовать практически все разновидности сводов, в сложных сочетаниях и способах стыковки.
5. Актуальной задачей является нахождение универсального способа расчета кладочных сводчатых конструкций и определения напряжений в них. Необходим комплексный подход, с использованием накопленных к настоящему времени данных из всех смежных областей.

Литература

- [1]. Шеренцис А. А. Тонкие кирпичные своды. М.: Изд-во Академии Архитектуры СССР, 1945. 80 с.
- [2]. Лахтин Н. К. Расчёт арок и сводов. СПб., 1911. 106 с.
- [3]. Кузнецов А. В. Своды и их декор. М: Изд-во В. Шевчук, 2003. 420 с.
- [4]. Стаценко В. Г. Части зданий. С-Пб, 1912. 523 с.
- [5]. Подъяпольский С. С., Бессонов Г. Б., Беляев, Л. А., Постникова Т. М. Реставрация памятников архитектуры. М.: Стройиздат, 1988, 267 с.
- [6]. Крамина Т. А. Реконструкция арочных и сводчатых систем в памятниках архитектуры // Дизайн-ревью. 2009. № 1/4. С. 59-62.
- [7]. L'Orme P. Le Premier Tome de L'Architecture. Paris. 1567. 587 p.
- [8]. Milani, G. (2014) Upper bound sequential linear programming mesh adaptation scheme for collapse analysis of masonry vaults. *Advances in Engineering Software*. 2014. No. 79. pp. 91-110.
- [9]. Akhaveissy A.H., Milani G. (2013) Pushover analysis of large scale unreinforced masonry structures by means of a fully 2D non-linear model. *Construction and Building Materials*. 2013. No. 41. pp. 276-295.
- [10]. Milani G., Cecchi A. (2013) Compatible model for herringbone bond masonry: Linear elastic homogenization, failure surfaces and structural implementation. *International Journal of Solids and Structures*. 2013. No. 50.(20–21). pp. 3274-3296.
- [11]. Basilio I., Fedele R., Lourenço P.B., Milani G. (2014) Assessment of curved FRP-reinforced masonry prisms: Experiments and modeling. *Construction and Building Materials*. 2014. No. 51. pp. 492-505.
- [12]. Reccia E., Milani G., Cecchi A., Tralli A. (2014) Full 3D homogenization approach to investigate the behavior of masonry arch bridges: The Venice trans-lagoon railway bridge. *Construction and Building Materials*. 2014. No. 66 pp. 567-586.
- [13]. Cecchi A., Milani G., Tralli A. (2007) Reissner–Mindlin limit analysis model for out-of-plane loaded running bond masonry walls. *International Journal of Solids and Structures*. 2007. No. 44(5). pp. 1438-1460.
- [14]. Milani E., Milani G., Tralli A. (2008). Limit analysis of masonry vaults by means of curved shell Finite Elements and homogenization. *International Journal of Solids and Structures*. 2008. No. 45(20). pp. 5258-5288.
- [15]. Vivó, P.N., López, J.C., Cosme, G.M. (2012) The ribless lierne vault at the gates of quart in Valencia. *EGA Revista de Expression Grafica Arquitectonica*. 2012. No. 19. pp. 190-199.
- [16]. Taín-Guzmán, M., Alonso-Rodríguez, M.A., Calvo-López, J., Natividad-Vivó, P. (2012) Stonecutters' literature and construction practice in early modern Gothic: The tracings for a rib vault at the cathedral of Tui in Galicia. *Construction History*. 2012. No. 27. pp. 1-21.
- [17]. Rababeh, S., Al Qablan, H., El-Mashaleh, M. (2013) Utilization of tie-beams for strengthening stone masonry arches in Nabataean construction. *Journal of Architectural Conservation*. 2013. No. 19. pp. 118-130.
- [18]. Héczey-Markó, A., Rácz, M. (2013) Building archaeological research of the St. Michael Parish Church in Érd. *Épites-Epiteszettudomány*. 2013. No. 41. pp. 283-314.
- [19]. Ibarra-Sevilla, B. (2013) The first ribbed vaults in the Americas: Craft skills and construction processes of indigenous people in the Mixtec region of southern Mexico. *Construction History*. 2013. No. 28. pp. 1-25.
- [20]. Ibarra-Sevilla, B. (2013) From stone fretwork to ribbed vaults, sixteenth-century masonry construction techniques of the mexican indigenous people. *Informes de la Construcción*. 2013. No. 65. pp. 65-80.
- [21]. Ramos, A., León, J. (2013) Classification of backfill at the extrados of masonry vaults. *Informes de la Construcción*. 2013. No. 65. pp. 471-480.
- [22]. Wendland, D., Ventas-Sierra, M.J. (2013) Designing a masonry shell in the reconstructed vault of the palace chapel at dresden - an attempt to recover the forgotten art of late gothic vault construction. *Informes de la Construcción*. 2013. No. 65. pp. 49-63.
- [23]. Palacios, J.C., Bravo, S.C. (2013) Design and construction of grid crossing vaults in Spain during the 16th century. *Informes de la Construcción*. 2013. No. 65. pp. 81-94.
- [24]. Senent-Domínguez, R., Pérez-de-los-Ríos, C. (2013) The construction of the rectangular groin vault in Gelabert's treatise: Theory and practice. *Informes de la Construcción*. 2013. No. 65. pp. 111-125.
- [25]. Çalik, I., Bayraktar, A., Türker, T., Karadeniz, H. (2014) Structural dynamic identification of a damaged and restored masonry vault using Ambient Vibrations. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2014. No. 55. pp. 462-472.

- [26]. Kumagai, R., Maeshima, A. (2014) Constructive characteristics of catalan vault through the construction experiment of full scale floor model. *AIJ Journal of Technology and Design*. 2014. No. 20. pp. 39-44.
- [27]. Block, P., Lachauer, L. (2014) Three-dimensional funicular analysis of masonry vaults. *Mechanics Research Communications*. 2014. No. 56. pp. 53-60.
- [28]. Verstrynghe, E., Schueremans, L., Smars, P. (2012) Controlled intervention: Monitoring the dismantlement and reconstruction of the flying buttresses of two Gothic churches. *International Journal of Architectural Heritage*. 2012. No. 6. pp. 689-708.
- [29]. García Sanz Calcedo, J., Fortea Luna, M., Rodríguez, A.M.R. (2012) Comparative analysis on environmental sustainability between masonry vaults and concrete structures. *Revista Ingenieria de Construcción*. 2012. No. 27. pp. 5-22.
- [30]. Atamturktur, S., Sevim, B. (2012) Seismic performance assessment of masonry tile domes through nonlinear finite-element analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2012. No. 26. pp. 410-423.
- [31]. Stablon, T., Sellier, A., Domede, N., Plu, B., Dieleman, L. (2012) Influence of building process on stiffness: Numerical analysis of a masonry vault including mortar joint shrinkage and crack re-closure effect. *Materiaux et Constructions*. 2012. No. 45. pp. 881-898.
- [32]. García, J., González, M., Losada, J.C. (2012) Tile vault architecture and construction around Eduardo Sacriste. *Informes de la Construcción*. 2012. No. 64. pp. 35-50.
- [33]. Gil-López, T. (2012) The vault of the chapel of the Presentation in Burgos Cathedral: "Divine canon? no, Cordovan proportion". *Nexus Network Journal*. 2012. No. 14. pp. 177-189.
- [34]. Elkhateeb, A.A. (2012) Domes in the Islamic architecture of Cairo city: A mathematical approach. *Nexus Network Journal*. 2012. No. 14. pp. 151-176.
- [35]. Beyer, K., Mangalathu, S. (2014) Numerical study on the peak strength of masonry spandrels with arches. *Journal of Earthquake Engineering*. 2014. No. 18. pp. 169-186.
- [36]. Sarhosis, V., Oliveira, D.V., Lemos, J.V., Lourenco, P.B. (2014) The effect of skew angle on the mechanical behaviour of masonry arches. *Mechanics Research Communications*. 2014. No. 61. pp. 53-59.
- [37]. Brune, P., Perucchio, R. (2012) Roman concrete vaulting in the great hall of Trajan's Markets: Structural evaluation. *Journal of Architectural Engineering*. 2012. No. 18. pp. 332-340.
- [38]. Block, P., Ciblac, T., Ochsendorf, J. (2006) Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings. *Computers and Structures*. 2006. No. 84. pp. 1841-1852.
- [39]. Heyman, J. *The stone skeleton: structural engineering of masonry architecture*. Cambridge University Press. 1995. 160 p.
- [40]. Marseglia, P.S., Micelli, F., Leone, M., Aiello, M.A. (2014) Modeling of masonry vaults as equivalent diaphragms. *Key Engineering Materials*. 2014. No. 628. pp. 185-190.
- [41]. Bovo, M., Mazzotti, C., Savoia, M. (2014) Structural behaviour of historical stone arches and vaults: Experimental tests and numerical analyses. *Engineering Materials*. 2014. No. 628. pp. 43-48.
- [42]. Wendland, D., Ventas-Sierra, M.J. (2013) Designing a masonry shell in the reconstructed vault of the palace chapel at dresden - an attempt to recover the forgotten art of late gothic vault construction. *Informes de la Construcción*. 2013. No. 65. pp. 49-63.
- [43]. Atamturktur, S., Fanning, P., Boothby, T.E. (2010) Traditional and operational modal testing of masonry vaults. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering and Computational Mechanics*. 2010. No. 163. pp. 213-223.
- [44]. Brocato, M., Mondardini, L. (2012) A new type of stone dome based on Abeille's bond. *International Journal of Solids and Structures*. 2012. No. 49. pp. 1786-1801.
- [45]. Fallacara, G., Resta, F., Spallucci, N., Tamboréro, L. (2011) The Vault of the Hôtel de Ville in Arles. *Nexus Network Journal*. 2011. No. 13. pp. 599-629.
- [46]. Ulm, F.-J., Piau, J. M. (1993) Fall of a temple. Theory of contact applied to masonry joints. *Journal of structural engineering New York, N.Y.* 1993. No. 119. pp. 687-697.
- [47]. Бернгард В. Р. Арки и своды. Руководство к устройству и расчету арочных и сводчатых перекрытий. СПб.: Типография Ю.Н. Эрлих, 1901. 128 с.
- [48]. Кривошеин Н. К. Расчет упругих сводов. Расчет упругих сводов по методу предельного равновесия. Петроград: Типография Бенке, 1918. 42 с.
- [49]. Белецкий Д. В., Казарян А. Ю. Тхаба-Ерды. Предварительные результаты нового исследования храма в Ингушетии // *Архитектурное наследство*. 2009. № 50. С. 73-94.

- [50]. Беляева З. В., Митюшов Е. А. Геометрическое моделирование пространственных конструкций. Своды // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. №1. С. 53-63.
- [51]. Ищук Е. М., Соколов Б. С. Исследование прочности и деформаций кирпичных стен и сводов грановитой палаты Московского кремля // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 4 (249). С. 15-20.
- [52]. Бессонов Г. Б. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. Методические рекомендации. М.: Союзреставрация, 1989. 171 с.
- [53]. Кондратенко А. А., Черных А. Г., Куправа Л.П. Расчет полигональных конструкций на примере полигонального свода // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 11. С. 39.
- [54]. Калдароол А-Х. Б. Определение несущей способности кладки в зданиях памятников архитектуры XVIII-XIX веков // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 3. С. 104-106.
- [55]. Пятницкий А. А., Махов И. О., Пыльцин М.А. Усиление сводчатых перекрытий здания-памятника // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 3 (44). С. 92-95.
- [56]. Пашкин Е. М., Бессонов Г. Б. Диагностика деформации памятников архитектуры. М.: Стройиздат, 1984. 151 с.
- [57]. Доладов Ю. И., Доладова И. П. Возведение купола на 13-м уровне колокольни Иверского монастыря в Самаре // Вестник СГАСУ. 2013. № 1 (9). С. 82-87.
- [58]. Кужахметова Э. Р. Архитектурная выразительность и физиологическая целесообразность зданий с криволинейными поверхностями стен и перекрытий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. № 11. С. 42-45.
- [59]. Дмитриева С. Л. Развитие приемов решения купольных структур в архитектуре культовых сооружений Италии эпохи Ренессанса // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 5 (24). С. 18-21.
- [60]. Докула С. М. Прочность и деформативность железобетонного купола в виде зонтичной оболочки // Приволжский научный журнал. 2011. № 1 (17). С. 30-36.
- [61]. Гречнева Н. В. «Неоэклетика» в современной храмовой архитектуре // Известия Алтайского государственного университета. 2011. № 2/1 (70). С. 163-165.
- [62]. Мухин А. С. Купол как символическая форма // Грамота. 2013. № 7 (33). С. 111-115.
- [63]. Кравчук Е. В., Кравчук В. А. История создания нормативных и правовых основ проектирования зданий и сооружений (XVIII в. до н.э. – XIX в.) // Вестник ТОГУ. 2013. № 1 (28). С. 297-306.
- [64]. Бернштейн С. А. Очерки по истории строительной механики. М.: Госиздат, 1957. 236 с.
- [65]. Шишин М. Ю., Исмаил Х. Д. Тадж-Махал: опыт философско-искусствоведческой интерпретации и фрактального анализа // Вестник Алтайской науки. 2012. № 2. С. 127-134.
- [66]. Anania L., Badala A., D'Agata G. (2013) The post strengthening of the masonry vaults by the Ω -Wrap technique based on the use of C-FRP. Construction and Building Materials. 2013. No. 47. pp. 1053-1068.
- [67]. Lorenzis L, Dimitri R, La Tegola A. (2007) Reduction of the lateral thrust of masonry arches and vaults with FRP composites. Construction and Building Materials. 2007. No. 21. pp. 1415-1430.
- [68]. Casas J. R. (2009) A probabilistic fatigue strength model for brick masonry under compression. Construction and Building Materials. 2009. No. 23. pp. 2964-2972.
- [69]. Roca P., López-Almansa F., Miquel J., Hanganu A. (2007) Limit analysis of reinforced masonry vaults. Engineering Structures. 2007. No. 29. pp. 431-439.
- [70]. Schueremans L., Van Genechten B. (2009) The use of 3D-laser scanning in assessing the safety of masonry vaults—A case study on the church of Saint-Jacobs. Optics and Lasers in Engineering. 2009. No. 47. pp. 329-335.
- [71]. Riveiro B., Solla M., Arteaga I., Arias P., Morer P. (2013) A novel approach to evaluate masonry arch stability on the basis of limit analysis theory and non-destructive geometric characterization. Automation in Construction. 2013. No. 31. pp. 140-148.
- [72]. Pérez-Aparicio J.L., Bravo R., Ortiz P. (2013) Refined element discontinuous numerical analysis of dry-contact masonry arches. Engineering Structures. 2013. No. 48. pp. 578-587.
- [73]. Baratta A. Corbi O. (2010) On the equilibrium and admissibility coupling in NT vaults of general shape. International Journal of Solids and Structures. 2010. No. 47. pp. 2276-2284.
- [74]. Cardone D., Gesualdi G. (2014) Design, testing and implementation of a Cu-SMA-based device for improving the thermal behavior of steel tie-rods. Engineering Structures. 2014. No. 65. pp. 42-51.

- [75].Bednarz L. J., Jasieńko J., Rutkowski M., Nowak T. P. (2014) Strengthening and long-term monitoring of the structure of an historical church presbytery. *Engineering Structures*. 2014. No. 81. pp. 62-75.
- [76].Bednarz L., Górski A., Jasieńko J., Rusiński E. (2011) Simulations and analyses of arched brick structures. *Automation in Construction*. 2011. No. 20. pp. 741-754.
- [77].Carini A., Genna F. (2012) Stability and strength of old masonry vaults under compressive longitudinal loads: Engineering analyses of a case study. *Engineering Structures*. 2012. No. 40. pp. 218-229.
- [78].Fraternali F. (2010) A thrust network approach to the equilibrium problem of unreinforced masonry vaults via polyhedral stress functions. *Mechanics Research Communications*. 2010. No. 37. pp. 198-204.
- [79].Sánchez-Beitia S. (2013) Analysis of the collapse mechanisms in uncracked arches: The role of friction forces and stereotomy in masonry. *Engineering Failure Analysis*. 2013. No. 35. pp. 326-333.
- [80].D'Ambrisi A., Feo L., Focacci F. (2013) Masonry arches strengthened with composite unbonded tendons. *Composite Structures*. 2013. No. 98. pp. 323-329.
- [81].Garmendia L., San-José J.T., García D., Larrinaga P. (2011) Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material. *Construction and Building Materials*. 2011. No. 25. pp. 4374-4385.
- [82].Riveiro B., Caamaño J.C., Arias P., Sanz E. (2011) Photogrammetric 3D modelling and mechanical analysis of masonry arches: An approach based on a discontinuous model of voussoirs. *Automation in Construction*. 2011. No. 20. pp. 380-388.
- [83].Borri A., Castori G., Corradi M. (2011) Intrados strengthening of brick masonry arches with composite materials. *Composites Part B: Engineering*. 2011. No. 42. pp. 1164-1172.
- [84].Betti M., Drosopoulos G. A., Stavroulakis G. E. (2008) Two non-linear finite element models developed for the assessment of failure of masonry arches. *Comptes Rendus Mécanique*. 2008. No. 336. pp. 42-53.
- [85].Cancelliere I., Imbimbo M., Sacco E. (2010) Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches. *Engineering Structures*. 2010. No. 32. pp. 776-792.
- [86].Caporale A., Luciano R., Rosati L. (2006) Limit analysis of masonry arches with externally bonded FRP reinforcements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2006. No. 196. pp. 247-260.
- [87].De Santis S., Tomor A. K. (2013) Laboratory and field studies on the use of acoustic emission for masonry bridges. *NDT & E International*. 2013. No. 55. pp. 64-74.
- [88].Felice G. (2009) Assessment of the load-carrying capacity of multi-span masonry arch bridges using fibre beam elements. *Engineering Structures*. 2009. No. 31. pp. 1634-1647.
- [89].Cavicchi A., Gambarotta L. (2007) Lower bound limit analysis of masonry bridges including arch-fill interaction. *Engineering Structures*. 2007. No. 29. pp. 3002-3014.
- [90].Cavicchi A., Gambarotta L. (2006) Two-dimensional finite element upper bound limit analysis of masonry bridges. *Computers & Structures*. 2006. No. 84. pp. 2316-2328.
- [91].Thavalingam A., Bicanic N., Robinson J. I., Ponniah D. A. (2001) Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges. *Computers & Structures*. 2001. No. 79. pp. 1821-1830.
- [92].Павлов В. В., Хорьков Е. В. Экспериментальные исследования работы усиленных кирпичных арок при горизонтальной подвижке опор // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 2. С. 90-96.

Зимин С.С., Кокоткова О.Д., Беспалов В.В. Сводчатые конструкции исторических зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №2(29). С. 57-72.

Zimin S.S., Kokotkova O.D., Bepalov V.V. Vault structures of historical buildings. Construction of Unique Buildings and Structures, 2015, 2(29), Pp. 57-72. (rus)

Vault structures of historical buildings

S.S. Zimin¹, O.D. Kokotkova², V.V. Bespalov³

Saint-Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, 195251, Russia

ARTICLE INFO

Analytical review

Article history

Received 15 November 2014

Accepted 23 December 2014

Keywords

masonry vault,
arch,
structural scheme,
historical building,
analysis

ABSTRACT

The article is devoted to description base varieties of vault structures arched before XXth century. History of studying structural features of vaults and nowadays situation were considered. According to the analysis, the following conclusions are:

- 1) at the present time, in spite of technological progress, still has not found the law of stress distribution in the vault body and not a set of criteria developed by the strength and stability;
- 2) there is no researches which would be deeply engaged in this issue in Russia;
- 3) the most common way to date the approximate calculation of the vaulted structures is the use of software that take into account the nonlinearity and anisotropy of these structures, such as ANSYS or SOFiSTiK. Requisite of fundamental research structural behavior have been founded. Vaults of main building St.-Petersburg State polytechnic university were inspected and analyzed.

³

Corresponding author:

+7 (911) 196 8803, kokotkova0308@me.com (Oksana Dmitrievna Kokotkova, Student)

¹

+7 (921) 347 7701, zimin_serger@mail.ru (Sergey Sergeevich Zimin, Senior Lecturer)

²

+7 (981) 785 0899, chanchullero@yandex.ru (Vladimir Vladimirovich Bespalov, Student)

References

- [1]. Sherentsis A. A. *Tonkiye kirpichnyye svody* [Thin brick vaults]. Moscow: Izd-vo Akademii Arkhitektury SSSR, 1945. 80 p. (rus)
- [2]. Lakhtin N. K. *Raschet arok i svodov* [The calculation of arches and vaults]. Saint-Petersburg, 1911. 106 p. (rus)
- [3]. Kuznetsov A. V. *Svody i ikh dekor* [Vaults and their decoration]. Moscow: V. Shevchuk, 2003. 420 p. (rus)
- [4]. Statsenko V. G. *Chasti zdaniy* [Parts of buildings]. Saint-Petersburg, 1912. 523 p. (rus)
- [5]. Podyapolskiy S. S., Bessonov G. B., Belyayev, L. A., Postnikova T. M. *Restavratsiya pamyatnikov arkhitektury* [Restoration of monuments]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 267 p. (rus)
- [6]. Kramina T. A. *Rekonstruktsiya arochnykh i svodchatykh sistem v pamyatnikakh arkhitektury* [Reconstruction of the arched and vaulted systems in architectural monuments]. *Dizayn-revyu*. 2009. No. 1/4. pp. 59-62. (rus)
- [7]. L'Orme P. *Le Premier Tome de L'Architecture*. Paris. 1567. 587 p.
- [8]. Milani, G. (2014) Upper bound sequential linear programming mesh adaptation scheme for collapse analysis of masonry vaults. *Advances in Engineering Software*. 2014. No. 79. pp. 91-110.
- [9]. Akhaveissy A.H., Milani G. (2013) Pushover analysis of large scale unreinforced masonry structures by means of a fully 2D non-linear model. *Construction and Building Materials*. 2013. No. 41. pp. 276-295.
- [10]. Milani G., Cecchi A. (2013) Compatible model for herringbone bond masonry: Linear elastic homogenization, failure surfaces and structural implementation. *International Journal of Solids and Structures*. 2013. No. 50.(20–21). pp. 3274-3296.
- [11]. Basilio I., Fedele R., Lourenço P.B., Milani G. (2014) Assessment of curved FRP-reinforced masonry prisms: Experiments and modeling. *Construction and Building Materials*. 2014. No. 51. pp. 492-505.
- [12]. Reccia E., Milani G., Cecchi A., Tralli A. (2014) Full 3D homogenization approach to investigate the behavior of masonry arch bridges: The Venice trans-lagoon railway bridge. *Construction and Building Materials*. 2014. No. 66 pp. 567-586.
- [13]. Cecchi A., Milani G., Tralli A. (2007) Reissner–Mindlin limit analysis model for out-of-plane loaded running bond masonry walls. *International Journal of Solids and Structures*. 2007. No. 44(5). pp. 1438-1460.
- [14]. Milani E., Milani G., Tralli A. (2008). Limit analysis of masonry vaults by means of curved shell Finite Elements and homogenization. *International Journal of Solids and Structures*. 2008. No. 45(20). pp. 5258-5288.
- [15]. Vivó, P.N., López, J.C., Cosme, G.M. (2012) The ribless lierne vault at the gates of quart in Valencia. *EGA Revista de Expression Grafica Arquitectonica*. 2012. No. 19. pp. 190-199.
- [16]. Taín-Guzmán, M., Alonso-Rodríguez, M.A., Calvo-López, J., Natividad-Vivó, P. (2012) Stonecutters' literature and construction practice in early modern Gothic: The tracings for a rib vault at the cathedral of Tui in Galicia. *Construction History*. 2012. No. 27. pp. 1-21.
- [17]. Rababeh, S., Al Qablan, H., El-Mashaleh, M. (2013) Utilization of tie-beams for strengthening stone masonry arches in Nabataean construction. *Journal of Architectural Conservation*. 2013. No. 19. pp. 118-130.
- [18]. Héczey-Markó, A., Rácz, M. (2013) Building archaeological research of the St. Michael Parish Church in Érd. *Épites-Epiteszettudomány*. 2013. No. 41. pp. 283-314.
- [19]. Ibarra-Sevilla, B. (2013) The first ribbed vaults in the Americas: Craft skills and construction processes of indigenous people in the Mixtec region of southern Mexico. *Construction History*. 2013. No. 28. pp. 1-25.
- [20]. Ibarra-Sevilla, B. (2013) From stone fretwork to ribbed vaults, sixteenth-century masonry construction techniques of the mexican indigenous people. *Informes de la Construcción*. 2013. No. 65. pp. 65-80.
- [21]. Ramos, A., León, J. (2013) Classification of backfill at the extrados of masonry vaults. *Informes de la Construcción*. 2013. No. 65. pp. 471-480.
- [22]. Wendland, D., Ventas-Sierra, M.J. (2013) Designing a masonry shell in the reconstructed vault of the palace chapel at dresden - an attempt to recover the forgotten art of late gothic vault construction. *Informes de la Construcción*. 2013. No. 65. pp. 49-63.
- [23]. Palacios, J.C., Bravo, S.C. (2013) Design and construction of grid crossing vaults in Spain during the 16th century. *Informes de la Construcción*. 2013. No. 65. pp. 81-94.
- [24]. Senent-Domínguez, R., Pérez-de-los-Ríos, C. (2013) The construction of the rectangular groin vault in Gelabert's treatise: Theory and practice. *Informes de la Construcción*. 2013. No. 65. pp. 111-125.

- [25].Çalik, I., Bayraktar, A., Türker, T., Karadeniz, H. (2014) Structural dynamic identification of a damaged and restored masonry vault using Ambient Vibrations. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2014. No. 55. pp. 462-472.
- [26].Kumagai, R., Maeshima, A. (2014) Constructive characteristics of catalan vault through the construction experiment of full scale floor model. AIJ Journal of Technology and Design. 2014. No. 20. pp. 39-44.
- [27].Block, P., Lachauer, L. (2014) Three-dimensional funicular analysis of masonry vaults. Mechanics Research Communications. 2014. No. 56. pp. 53-60.
- [28].Verstryngge, E., Schueremans, L., Smars, P. (2012) Controlled intervention: Monitoring the dismantlement and reconstruction of the flying buttresses of two Gothic churches. International Journal of Architectural Heritage. 2012. No. 6. pp. 689-708.
- [29].García Sanz Calcedo, J., Fortea Luna, M., Rodríguez, A.M.R. (2012) Comparative analysis on environmental sustainability between masonry vaults and concrete structures. Revista Ingenieria de Construcción. 2012. No. 27. pp. 5-22.
- [30].Atamturktur, S., Sevim, B. (2012) Seismic performance assessment of masonry tile domes through nonlinear finite-element analysis. Journal of Performance of Constructed Facilities. 2012. No. 26. pp. 410-423.
- [31].Stablon, T., Sellier, A., Domede, N., Plu, B., Dieleman, L. (2012) Influence of building process on stiffness: Numerical analysis of a masonry vault including mortar joint shrinkage and crack re-closure effect. Materiaux et Constructions. 2012. No. 45. pp. 881-898.
- [32].García, J., González, M., Losada, J.C. (2012) Tile vault architecture and construction around Eduardo Sacriste. Informes de la Construcción. 2012. No. 64. pp. 35-50.
- [33].Gil-López, T. (2012) The vault of the chapel of the Presentation in Burgos Cathedral: "Divine canon? no, Cordovan proportion". Nexus Network Journal. 2012. No. 14. pp. 177-189.
- [34].Elkhateeb, A.A. (2012) Domes in the Islamic architecture of Cairo city: A mathematical approach. Nexus Network Journal. 2012. No. 14. pp. 151-176.
- [35].Beyer, K., Mangalathu, S. (2014) Numerical study on the peak strength of masonry spandrels with arches. Journal of Earthquake Engineering. 2014. No. 18. pp. 169-186.
- [36].Sarhosis, V., Oliveira, D.V., Lemos, J.V., Lourenco, P.B. (2014) The effect of skew angle on the mechanical behaviour of masonry arches. Mechanics Research Communications. 2014. No. 61. pp. 53-59.
- [37].Brune, P., Perucchio, R. (2012) Roman concrete vaulting in the great hall of Trajan's Markets: Structural evaluation. Journal of Architectural Engineering. 2012. No. 18. pp. 332-340.
- [38].Block, P., Ciblac, T., Ochsendorf, J. (2006) Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings. Computers and Structures. 2006. No. 84. pp. 1841-1852.
- [39].Heyman, J. The stone skeleton: structural engineering of masonry architecture. Cambridge University Press. 1995. 160 p.
- [40].Marseglia, P.S., Micelli, F., Leone, M., Aiello, M.A. (2014) Modeling of masonry vaults as equivalent diaphragms. Key Engineering Materials. 2014. No. 628. pp. 185-190.
- [41].Bovo, M., Mazzotti, C., Savoia, M. (2014) Structural behaviour of historical stone arches and vaults: Experimental tests and numerical analyses. Engineering Materials. 2014. No. 628. pp. 43-48.
- [42].Wendland, D., Ventas-Sierra, M.J. (2013) Designing a masonry shell in the reconstructed vault of the palace chapel at dresden - an attempt to recover the forgotten art of late gothic vault construction. Informes de la Construcción. 2013. No. 65. pp. 49-63.
- [43].Atamturktur, S., Fanning, P., Boothby, T.E. (2010) Traditional and operational modal testing of masonry vaults. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering and Computational Mechanics. 2010. No. 163. pp. 213-223.
- [44].Brocato, M., Mondardini, L. (2012) A new type of stone dome based on Abeille's bond. International Journal of Solids and Structures. 2012. No. 49. pp. 1786-1801.
- [45].Fallacara, G., Resta, F., Spallucci, N., Tamboréro, L. (2011) The Vault of the Hôtel de Ville in Arles. Nexus Network Journal. 2011. No. 13. pp. 599-629.
- [46].Ulm, F.-J., Piau, J. M. (1993) Fall of a temple. Theory of contact applied to masonry joints. Journal of structural engineering New York, N.Y. 1993. No. 119. pp. 687-697.
- [47].Berngard V. R. Arki i svody. *Rukovodstvo k ustroystvu i raschetu arochnykh i svodchatykh perekrytiy* [Arches and vaults. Guide to the device and the calculation of arched and vaulted ceilings]. Saint-Petersburg: Tipografiya Yu.N. Erlikh, 1901. 128 p. (rus)

- [48]. Krivoshein N. K. *Raschet uprugikh svodov. Raschet uprugikh svodov po metodu predelnogo ravnovesiya* [The calculation of elastic vaults. The calculation of elastic vaults by the method of limit equilibrium]. Petrograd: Tipografiya Benke, 1918. 42 p. (rus)
- [49]. Beletskiy D. V., Kazaryan A. Yu. Tkhaba-Yerdy. *Predvaritelnyye rezultaty novogo issledovaniya khrama v Ingushetii* [Preliminary results of a new study of the temple in Ingushetia]. *Arkhitekturnoye nasledstvo*. 2009. No. 50. pp. 73-94. (rus)
- [50]. Belyayeva Z. V., Mityushov Ye. A. *Geometricheskoye modelirovaniye prostranstvennykh konstruksiy. Svody* [Geometric modeling of spatial structures. Vaults]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2010. No. 1. pp. 53-63. (rus)
- [51]. Ishchuk Ye. M., Sokolov B. S. *Issledovaniye prochnosti i deformatsiy kirpichnykh sten i svodov granovitoy palaty Moskovskogo kremlya* [The study of strength and deformation of brick vaults and walls of the Faceted Chamber of the Moscow Kremlin]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2013. No. 4 (249). pp. 15-20. (rus)
- [52]. Bessonov G. B. *Issledovaniye deformatsiy, raschet nesushchey sposobnosti i konstruktivnoye ukrepleniye drevnykh raspornykh sistem. Metodicheskiye rekomendatsii* [Research on the deformation, the calculation of the bearing capacity and structural strengthening systems of ancient spacers. Guidelines]. Moscow: Soyuzrestavratsiya, 1989. 171 p. (rus)
- [53]. Kondratenko A. A., Chernykh A. G., Kuprava L.R. *Raschet poligonalnykh konstruksiy na primere poligonalnogo svoda* [Calculation of polygonal structures on the example of a set of polygonal]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2009. No. 11. p. 39. (rus)
- [54]. Kaldarool A-Kh. B. *Opredeleniye nesushchey sposobnosti kladki v zdaniyakh pamyatnikov arkhitektury XVIII-XIX vekov* [Determination of the bearing capacity of masonry buildings of architectural monuments XVIII-XIX centuries]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2012. No. 3. pp. 104-106. (rus)
- [55]. Pyatnitskiy A. A., Makhov I. O., Pyltsin M.A. *Usileniye svodchatykh perekrytiy zdaniya-pamyatnika* [Strengthening vaulted ceilings monument]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2014. No. 3 (44). pp. 92-95. (rus)
- [56]. Pashkin Ye. M., Bessonov G. B. *Diagnostika deformatsii pamyatnikov arkhitektury* [Diagnosis deformation of architectural monuments]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 151 p. (rus)
- [57]. Doladov Yu. I., Doladova I. P. *Vozvedeniye kupola na 13-m urovne kolokolni Iverskogo monastyrnya v Samare* [Construction of the dome on the 13th level of the bell tower of the monastery in Samara Iver]. *Vestnik SGASU*. 2013. No. 1 (9). pp. 82-87. (rus)
- [58]. Kuzhakhmetova E. R. *Arkhitekturnaya vyrazitel'nost i fiziologicheskaya tselesoobraznost zdaniy s krivolineynymi poverkhnostyami sten i perekrytiy* [Architectural expression and physiological appropriateness of buildings with curved surfaces of walls and ceilings]. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*. 2012. No. 11. pp. 42-45. (rus)
- [59]. Dmitriyeva S. L. *Razvitiye priyemov resheniya kupolnykh struktur v arkhitekture kultovykh sooruzheniy Italii epokhi Renessansa* [Development of methods of solving dome structures in the architecture of religious buildings of Renaissance Italy]. *Mir nauki, kultury, obrazovaniya*. 2010. No. 5 (24). pp. 18-21. (rus)
- [60]. Dokula S. M. *Prochnost i deformativnost zhelezobetonnoy kupola v vide zontichnoy obolochki* [Strength and deformability of reinforced concrete dome in the form of an umbrella shell]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2011. No. 1 (17). pp. 30-36. (rus)
- [61]. Grechneva N. V. *«Neoeklektika» v sovremennoy khramovoy arkhitekture* [Neoeklektika in modern temple architecture]. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011. No. 2/1 (70). pp. 163-165. (rus)
- [62]. Mukhin A. S. *Kupol kak simvolicheskaya forma* [Dome as a symbolic form]. *Gramota*. 2013. No. 7 (33). pp. 111-115. (rus)
- [63]. Kravchuk Ye. V., Kravchuk V. A. *Istoriya sozdaniya normativnykh i pravovykh osnov proyektirovaniya zdaniy i sooruzheniy (XVIII v. do n.e. – XIX v.)* [History of the regulatory and legal basis for designing buildings and structures (XVIII BC – XIX AD)]. *Vestnik TOGU*. 2013. No. 1 (28). pp. 297-306. (rus)
- [64]. Bernshteyn S. A. *Ocherki po istorii stroitel'noy mekhaniki* [Essays on the history of structural mechanics]. Moscow: Gosizdat, 1957. 236 p. (rus)
- [65]. Shishin M. Yu., Ismail Kh. D. *Tadzh-Makhal: opyt filosofsko-iskusstvovedcheskoy interpretatsii i fraktalnogo analiza* [Taj Mahal: The Experience of Art and philosophical interpretation and fractal analysis]. *Vestnik Altayskoy nauki*. 2012. No. 2. pp. 127-134. (rus)
- [66]. Anania L., Badala A., D'Agata G. (2013) The post strengthening of the masonry vaults by the Ω -Wrap technique based on the use of C-FRP. *Construction and Building Materials*. 2013. No. 47. pp. 1053-1068.
- [67]. Lorenzis L, Dimitri R, La Tegola A. (2007) Reduction of the lateral thrust of masonry arches and vaults with FRP composites. *Construction and Building Materials*. 2007. No. 21. pp. 1415-1430.

- [68].Casas J. R. (2009) A probabilistic fatigue strength model for brick masonry under compression. *Construction and Building Materials*. 2009. No. 23. pp. 2964-2972.
- [69].Roca P., López-Almansa F., Miquel J., Hanganu A. (2007) Limit analysis of reinforced masonry vaults. *Engineering Structures*. 2007. No. 29. pp. 431-439.
- [70].Schueremans L., Van Genechten B. (2009) The use of 3D-laser scanning in assessing the safety of masonry vaults—A case study on the church of Saint-Jacobs. *Optics and Lasers in Engineering*. 2009. No. 47. pp. 329-335.
- [71].Riveiro B., Solla M., Arteaga I., Arias P., Morer P. (2013) A novel approach to evaluate masonry arch stability on the basis of limit analysis theory and non-destructive geometric characterization. *Automation in Construction*. 2013. No. 31. pp. 140-148.
- [72].Pérez-Aparicio J.L., Bravo R., Ortiz P. (2013) Refined element discontinuous numerical analysis of dry-contact masonry arches. *Engineering Structures*. 2013. No. 48. pp. 578-587.
- [73].Baratta A. Corbi O. (2010) On the equilibrium and admissibility coupling in NT vaults of general shape. *International Journal of Solids and Structures*. 2010. No. 47. pp. 2276-2284.
- [74].Cardone D., Gesualdi G. (2014) Design, testing and implementation of a Cu-SMA-based device for improving the thermal behavior of steel tie-rods. *Engineering Structures*. 2014. No. 65. pp. 42-51.
- [75].Bednarz L. J., Jasieńko J., Rutkowski M., Nowak T. P. (2014) Strengthening and long-term monitoring of the structure of an historical church presbytery. *Engineering Structures*. 2014. No. 81. pp. 62-75.
- [76].Bednarz L., Górski A., Jasieńko J., Rusiński E. (2011) Simulations and analyses of arched brick structures. *Automation in Construction*. 2011. No. 20. pp. 741-754.
- [77].Carini A., Genna F. (2012) Stability and strength of old masonry vaults under compressive longitudinal loads: Engineering analyses of a case study. *Engineering Structures*. 2012. No. 40. pp. 218-229.
- [78].Fraternali F. (2010) A thrust network approach to the equilibrium problem of unreinforced masonry vaults via polyhedral stress functions. *Mechanics Research Communications*. 2010. No. 37. pp. 198-204.
- [79].Sánchez-Beitia S. (2013) Analysis of the collapse mechanisms in uncracked arches: The role of friction forces and stereotomy in masonry. *Engineering Failure Analysis*. 2013. No. 35. pp. 326-333.
- [80].D'Ambrisi A., Feo L., Focacci F. (2013) Masonry arches strengthened with composite unbonded tendons. *Composite Structures*. 2013. No. 98. pp. 323-329.
- [81].Garmendia L., San-José J.T., García D., Larrinaga P. (2011) Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material. *Construction and Building Materials*. 2011. No. 25. pp. 4374-4385.
- [82].Riveiro B., Caamaño J.C., Arias P., Sanz E. (2011) Photogrammetric 3D modelling and mechanical analysis of masonry arches: An approach based on a discontinuous model of voussoirs. *Automation in Construction*. 2011. No. 20. pp. 380-388.
- [83].Borri A., Castori G., Corradi M. (2011) Intrados strengthening of brick masonry arches with composite materials. *Composites Part B: Engineering*. 2011. No. 42. pp. 1164-1172.
- [84].Betti M., Drosopoulos G. A., Stavroulakis G. E. (2008) Two non-linear finite element models developed for the assessment of failure of masonry arches. *Comptes Rendus Mécanique*. 2008. No. 336. pp. 42-53.
- [85].Cancelliere I., Imbimbo M., Sacco E. (2010) Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches. *Engineering Structures*. 2010. No. 32. pp. 776-792.
- [86].Caporale A., Luciano R., Rosati L. (2006) Limit analysis of masonry arches with externally bonded FRP reinforcements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2006. No. 196. pp. 247-260.
- [87].De Santis S., Tomor A. K. (2013) Laboratory and field studies on the use of acoustic emission for masonry bridges. *NDT & E International*. 2013. No. 55. pp. 64-74.
- [88].Felice G. (2009) Assessment of the load-carrying capacity of multi-span masonry arch bridges using fibre beam elements. *Engineering Structures*. 2009. No. 31. pp. 1634-1647.
- [89].Cavicchi A., Gambarotta L. (2007) Lower bound limit analysis of masonry bridges including arch–fill interaction. *Engineering Structures*. 2007. No. 29. pp. 3002-3014.
- [90].Cavicchi A., Gambarotta L. (2006) Two-dimensional finite element upper bound limit analysis of masonry bridges. *Computers & Structures*. 2006. No. 84. pp. 2316-2328.
- [91].Thavalingam A., Bicanic N., Robinson J. I., Ponniah D. A. (2001) Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges. *Computers & Structures*. 2001. No. 79. pp. 1821-1830.

[92].Pavlov V. V., Khorkov Ye. V. Eksperimentalnyye issledovaniya raboty usilennykh kirpichnykh arok pri gorizontальной podvizhke opor [Experimental studies of reinforced brick arches with horizontal shifting of poles]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2014. No. 2. pp. 90-96. (rus).

Зимин С.С., Кокоткова О.Д., Беспалов В.В. Сводчатые конструкции исторических зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №2(29). С. 57-72.

Zimin S.S., Kokotkova O.D., Bespalov V.V. Vault structures of historical buildings. Construction of Unique Buildings and Structures, 2015, 2(29), Pp. 57-72. (rus)