

УДК 711.168

Иванова Елена Юрьевна

старший преподаватель

E-mail: ivanova.e.u@mail.ru

Хабибулина Альбина Гомеровна

кандидат экономических наук, доцент

E-mail: albgomer@mail.ru

Хабибулина Аделя Маратовна

ассистент

E-mail: adelya0514@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Васильева Юлия Владимировна

заместитель директора, эксперт судебной строительно-технической экспертизы,
эксперт по проведению государственной историко-культурной экспертизы

E-mail: gajavata@yandex.ru

ООО «Забир»

Адрес организации: 420012, Россия, г. Казань, ул. Маяковского, д. 30-17

Арочные распорные системы из кладочного материала в памятниках русской культовой архитектуры

Аннотация

Постановка задачи. Целью данной работы является анализ и обобщение результатов исследований в изучении древних покрытий кладочной структуры, а именно выявление и классификация возможных деформаций и причин, вызывающих эти деформации в пространственных распорных системах культовых памятников архитектуры, в том числе на территории административных районов республики Татарстан.

Результат. Исследования позволили установить факторы, под влиянием которых находится деформативность той или иной системы. Прежде всего, это ее конструктивные особенности, далее, свойства строительных материалов, из которых выполнена кладка, а также величина и характер нагрузки. Определено влияние деформативности опор на рабочие и инертные части сводов и роль ограждающих стен, подпружных арок и воздушных связей.

Выводы. В работе изучены деформации всех основных типов покрытий, произошедшие в процессе их многовековой эксплуатации, выявлены причины их возникновения. Систематизированы наиболее характерные причины деформаций основных типов систем, определены места, направления и внешние признаки изменений, что имеет большую практическую значимость при производстве оценки технического состояния, которая производится перед началом реставрационных работ. Представленные результаты актуальны и имеют практическую значимость, так как позволяют экспертам наиболее полно и точно оценить состояние конструкций, исключить ошибочные заключения, зачастую происходящие из-за отсутствия внешних проявлений скрытых дефектов и, тем самым, избежать внезапных обрушений и аварийных ситуаций.

Ключевые слова: свод, конструктивная система, арка, анализ, усиление, устойчивость.

Введение

В настоящее время выявлены и обследованы основные памятники культовой архитектуры в административных районах республики Татарстан. Результаты исследований представлены в трудах отдела Свода памятников Института истории Академии наук РТ. Работы историков и культурологов велись совместно с архитекторами. В итоге было издано несколько фундаментальных трудов, таких как «Республика

Татарстан: памятники истории и культуры. Каталог-справочник», а также «Свод памятников истории и культуры Татарстана»^{*}. Они, и им подобные издания, касающиеся древнерусских городов, содержат историко-архитектурные описания объектов. Однако, в них не затрагиваются вопросы, связанные с техническим состоянием конструкций и тем более с деформациями, возникающими в процессе существования и эксплуатации. Данная работа ставит целью в определенной мере восполнить этот пробел, тем более что большинство зданий и сооружений культового назначения в административных районах республики Татарстан требуют реставрации или срочной консервации.

Данная работа ставит задачу продолжить вышеназванное исследование памятников и дополнить его содержание инженерно-техническими аспектами, касающимися, в частности, распорных систем кладочной структуры в покрытиях храмовой архитектуры. Авторами исследования проанализирован, в том числе, и зарубежный опыт изучения проблемы [1-3]. Отсутствие систематизации дефектов, с которыми может сталкиваться эксперт, усложняет его работу, а, в некоторых случаях, не дает возможности в полной мере оценить техническое состояние конструкций и дать безошибочные прогнозы. Это обусловило цель работы: выявить и систематизировать ожидаемые места локализации деформаций, характерные для каждого из основных типов сводов, описать внешние признаки деформаций и, как итог, причины их возникновения.

Этот этап можно рассматривать как подготовительный к последующим исследованиям, связанным с выработкой рекомендаций по реставрации распорных систем в покрытиях древних зданий.

Воздействие нагрузок на распорные системы

Действие нагрузок на строительные конструкции и их элементы вызывает различную степень их сопротивляемости, отражающихся в противоположных, по своей сути, конструктивных понятиях – деформативности и жесткости.

Изначально рабочая схема определяет виды деформации характерные для данной конструктивной системы. Но в процессе функционирования обычно корректируется рабочая схема или свойства материалов строительства и в результате подвергается изменениям вид деформации. На деформационные изменения распорных систем определяющее влияние оказывают нагрузки, их характер и величина, а также следующие конструктивные особенности [4]:

- присутствие дублирующей рабочей схемы;
- пролет свода, радиус его кривизны;
- толщина свода;
- характеристики кладки;
- присутствие местных элементов, увеличивающих жесткость;
- качество опорного контура, опор.

Трехпролетная или пятипролетная арочно-стоечная конструктивная система лежит в основе наиболее распространенных, а именно крестово-купольных покрытий. Четыре центральных или восточных опоры-столба несут нагрузку от подпружных арок и от световых барабанов, как центральных, так и угловых, если таковые имеются. Отдельные модули, образованные подпружными арками, создают распоры, которые в конечном итоге образуют суммарный неуравновешенный распор системы, воспринимаемый вертикальными опорами, наружными стенами, пилонами. В некоторых случаях последние конструктивно объединялись и работали как диафрагмы жесткости.

Для безопасной эксплуатации распорной системы необходимо обеспечить условие, когда опрокидывающее действие распора будет меньше суммарной удерживающей реакции собственного веса и нагрузок, которые приложены к элементу с определенным плечом относительно точки опрокидывания. При невыполнении данного условия, равновесие

^{*} Республика Татарстан: памятники истории и культуры. Каталог-справочник. Казань: «Фест». 1993. 320 с. Свод памятников истории и культуры республики Татарстан. Том 1. Административные районы. Казань : «Мастер Лайн». 1999. 458 с.

системы может быть достигнуто использованием элементов жесткости, таких как апсиды, контрфорсы, пристройки, затяжки, установленные на уровне пят подпружных арок. Стоит отметить, что значимость затяжек, в данном случае, многие исследователи неоправданно преувеличивают [4]. Приемлемая статика распорных систем в начале эксплуатации определяется рациональностью соотношения вертикальных и горизонтальных нагрузок, приходящихся на элементы жесткости, от их устойчивости к действию распора и не зависит от наличия затяжек. Вовлечение воздушных связей в работу системы происходит лишь, когда возникают деформации. Этот факт необходимо учитывать. Переоценка роли затяжек обусловлена тем, что расчеты крестово-купольных систем производились исходя из полной нагрузки строительного периода. В расчетах не учитывалось свойство кладки, выполненной на растворе, и собственная жесткость опорного контура.

Безусловно, основным условием существования крестово-купольной системы является жесткость опорного контура. В то же время надо учитывать, что рабочие и инертные части сводов по-разному реагируют на деформативность опор. В частности, нервюры передают распор и давление на угловые части стен или пилоны. Отсюда и тот факт, что деформативность свода связана с устойчивостью угловых несущих конструкций [5].

Внешние признаки деформаций распорных систем и места их локализации

Зоны, в которых растягивающие и сдвигающие напряжения достигают своих максимальных значений, предрасполагают к образованию деформационных трещин или раскрытия швов. Можно выделить два типа трещин. Одни из них располагаются между самостоятельными деформационными блоками вдоль их границы, другие перпендикулярны плоскости деформаций и проходят по слабым перевязкам или технологическим швам.

В результате изучения характерных примеров, касающихся различных типов распорных систем, была произведена систематизация расположения деформативных образований в них [4].

В отдельно стоящих цилиндрических сводах трещины образуются по линии контакта с распалубкой на нижней поверхности вдоль верхней части криволинейной цилиндрической поверхности, ограничивающей свод по верху. В сводах, объединенных в системы, трещины образуются на границах смыкания в угловых частях. Также, при просадках трещины наблюдаются вокруг центральных столбов. Характерным примером вышесказанному могут служить деформации, выявленные в следующих культовых сооружениях: Церковь Введения во храм Пресвятой Богородицы и церковь Сретения Господня в г. Астрахани (1606-1620 гг.), ризница Церкви Николая Чудотворца в Спасо-Преображенском Соловецком монастыре (1830-1834 гг.), Петропавловский собор в г. Казани (1723 г.), Покровская церковь в д. Гремячка Рыбно-Слободского р-на РТ (1756 г.) [6-8].

Для крестовых сводов является характерным образование трещин вдоль распалубок вокруг замковой части. Это наблюдается в случае, если произошло ее провисание. При просадке и сдвиге опор вблизи них, свойственны деформации, перпендикулярные к диагональному ребру, расположенные поперек подпружных арок. В случае образования трещин вдоль ребра, на стадиях деформации происходит выпадение элементов распалубки. Результаты исследований крещатых сводов памятников архитектуры демонстрируют, что чаще всего образование трещин происходит на границе центральных арок с угловыми сомкнутыми частями свода.

При отсутствии затяжек трещины наблюдаются на нагруженной поверхности центральных арок на растяжении $\frac{2}{5} \div \frac{1}{2} f$ от уровня опоры (f – расчетная стрела арки). Примером могут служить деформации, зафиксированные в Архангельском соборе Рязанского кремля (XV-XVII вв.), в Свято-Успенском кафедральном соборе г. Тула (1762-1764 гг.), в церкви Рождества Пресвятой Богородицы с. Барятино, Мещовского р-на, Калужской обл. (1819 г.), в Владимиро-Богородицкой церкви д. Репьевка Бавлинского района РТ (1860 г.), в Покровской церкви д. Русские Сарсазы Чистопольского района РТ (1879 г.), в Михайло-Архангельской церкви д. Кармалы Нижнекамского района РТ (1882 г.) (рис. 1).

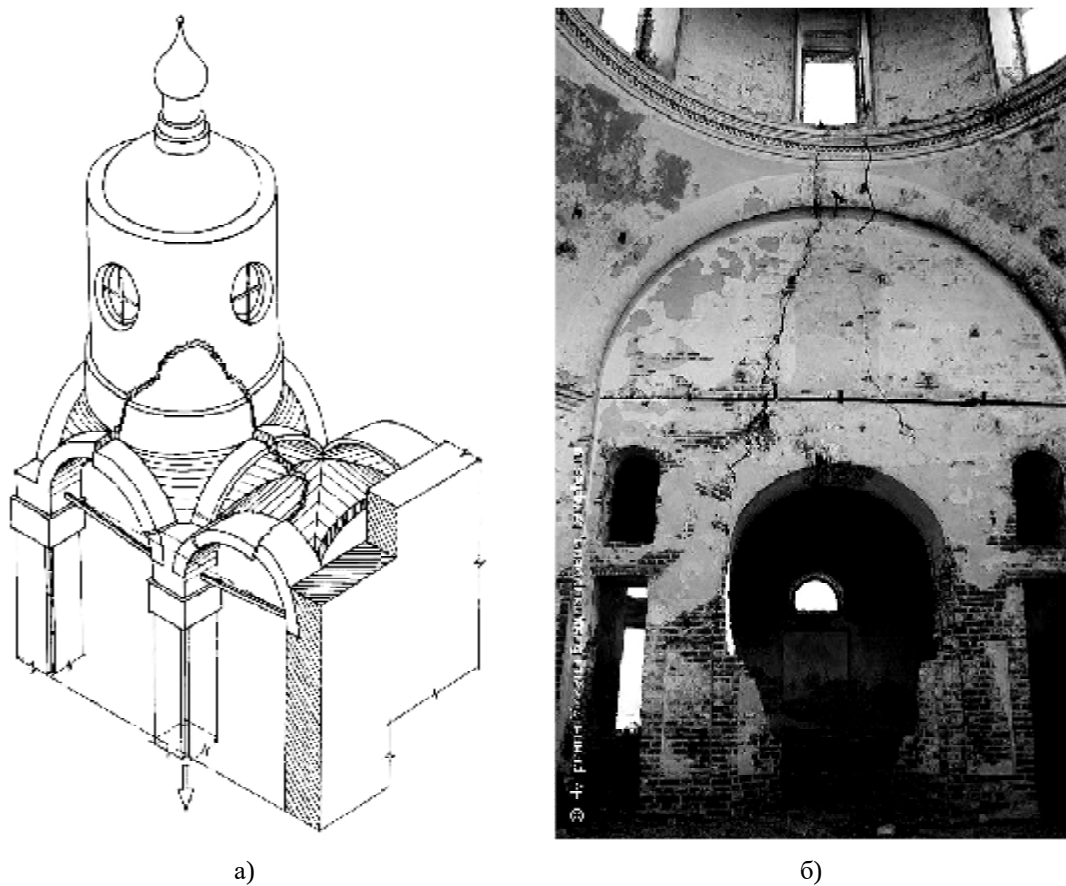


Рис. 1. Деформация арочно-стоечных систем при просадках опор:

- а) Деформация подпружных арок, сводов и светового барабана крестово-купольной системы при просадке центрального столба (Архангельский собор, г. Рязань, кон. XV-XVII вв.) [4];
 б) Фотофиксация деформации в алтарной части (Церковь Рождества Пресвятой Богородицы, с. Барятино, Мещовского р-на, Калужской обл., 1819 г.) [9]

Изучение технического состояния сомкнутых сводов культовых памятников древности позволило прийти к выводу, что трещины здесь чаще всего образуются на внешней поверхности лотков на высоте, колеблющейся в пределах $\frac{1}{3} \div \frac{1}{2} f$ от пяты свода. При наличии слабообжатых частей, трещины возникают в пограничных зонах этих частей. В качестве характерного явления для лотковых и цилиндрических сводов трещины располагаются в сомкнутых сводах в местах контакта с распалубками. Примерами могут служить: Трапезная палата Свято-Троицкого кафедрального собора (1597-1603 гг.), Церковь Собора Пресвятой Богородицы в Нижнем Новгороде (1703-1749 гг.), колокольня Спасо-Преображенского Соловецкого монастыря (1777 г.), Троицкая церковь в с. Новотроицкое Тукаевского р-на РТ (1835 г.).

Показательные и выразительные трещины появляются в результате использования сухой кладки на известковых и сложных растворах, как следствие возникновения хрупких деформаций. При наличии высокопрочных растворов в жесткой кладке возникают упругие деформации, которые зачастую дают о себе знать не сразу, а спустя продолжительный период времени, по истечении которого наступает явление усталости перенапряженного материала. При этом деформации зачастую происходят скачкообразно (рис. 2).

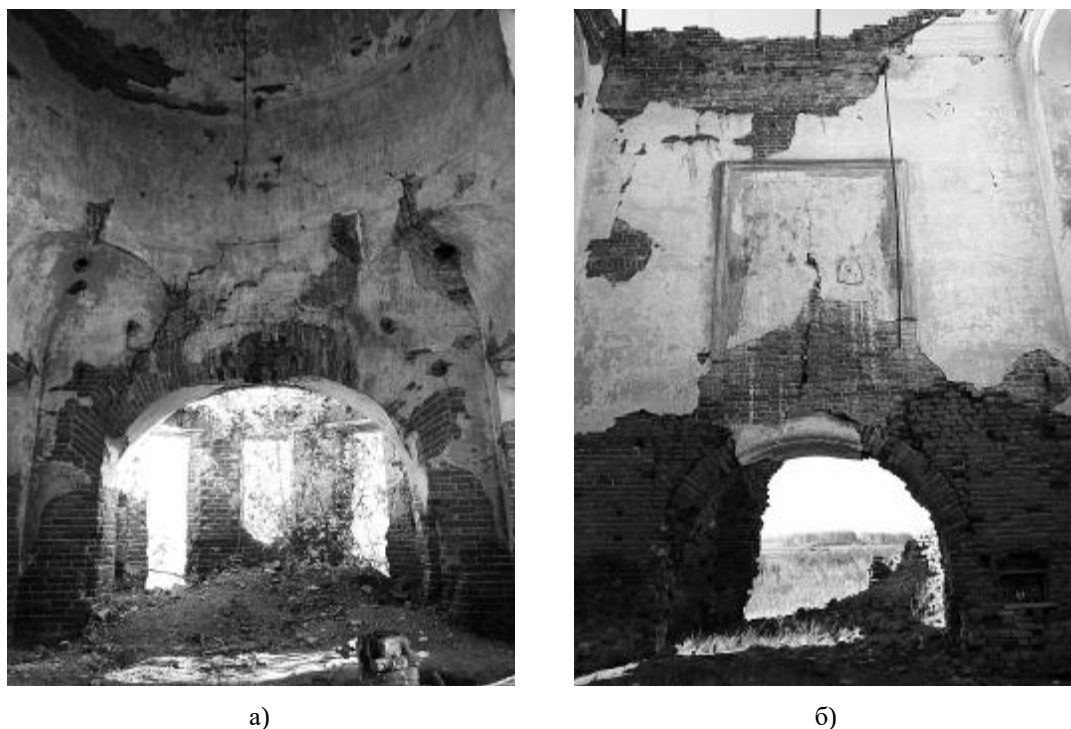


Рис. 2. Примеры деформации арочно-стоечных систем в храмах республики Татарстан:
а) Церковь Илии Пророка, с. Солдатская Письмянка, Бугульминский р-н (сер. XVIII в.);
б) Церковь Богоявления Господня, с. Сула, Бугульминский р-н (1806 г.) [10]

Разработка реконструктивных мероприятий базируется на выводах, сделанных экспертом при обследовании технического состояния конструкций, заключениях, которые могут оказаться неверными, что приводит к ошибочным рекомендациям по дальнейшей эксплуатации и реставрации. Объясняется это тем, что пластичная влажная кладка может не иметь видимых проявлений деформаций. Раскрытие швов в растянутой зоне несет замедленный характер. Когда возникает сокращение сжатой зоны по величине близкое к предельному, за ним следует расклинка отдельных камней или блоков кладки. Существование свода становится невозможным. Как следствие, происходит потеря устойчивости и возникает аварийная ситуация (обрушение).

Причины возникновения деформаций в основных типах сводов

Для наиболее часто встречающихся типов сводов в русских памятниках архитектуры выявлены следующие возможные причины деформаций [4].

Цилиндрический свод:

- просадка угловой части опорного контура и местная просадка с подвижкой;
- просадка с подвижкой угловой части опорного контура и местная просадка с подвижкой;
- с поворотом торцевых частей, просадкой (с подвижкой при перегрузке) центральной части опорного контура;
- поперечный сдвиг части объема при наличии жесткой кладки;
- усадка раствора, перегрузка свода, равномерная подвижка опор (коробовый свод в том числе при наличии лотка);
- просадка с подвижкой угловой части опорного контура и последовательная просадка или подвижка простенков между распалубками; просадка с наклоном торцевой части опорного контура (свод с распалубками);
- симметричная подвижка при перегрузке центральной зоны, общая седлообразная деформация (свод с гуртом под центральной нагрузкой).

Крестовый свод:

- последовательная подвижка угла опорного контура (вспарушенный свод с замкнутым опорным контуром);
- подвижка смежных столбчатых опор (вспарушенный свод на подпружных арках);
- сдвиг части объема (свод с жестким замкнутым опорным контуром);
- просадка опоры (плоский свод на столбчатых опорах).

Лотковый свод:

- подвижка «слабой» опоры подпружной арки (свод с разделительной подпружной аркой).

Системы из нескольких сводов:

- подвижка «слабой» опоры центральной подпружной арки (из двух крестовых вспарушенных сводов с общей подпружной аркой);
- последовательная просадка стены-опоры смежных сводов (из параллельных цилиндрических сводов с общими опорами);
- подвижка двух соседних стоечных опор наружного ряда (из цилиндрических сводов с распалубками на подпружных арках).

Заключение

В результате проведенных исследований приходим к выводу, что к основным факторам, исключаящим деформации в рассматриваемых распорных системах, относятся умеренность напряжений во всех элементах конструкции, недопущение растягивающих усилий и устойчивость системы к внешним воздействиям, климатическим условиям местности, инженерно-геологическим факторам, характеристикам используемых строительных материалов, технологии возведения и прочее.

Представленный обобщенный материал имеет практическую ценность при оценке технического состояния памятников, для расчета несущей способности конструкций и, в конечном итоге, для разработки рекомендаций по сносу, реставрации или консервации конкретной распорной системы. Новизна данной работы заключается в том, что она дополняет предыдущие исследования в этой области, рассматривает инженерно-технические аспекты памятников культовой архитектуры, расположенных на территории России и, в том числе, административных районов республики Татарстан.

Данное исследование представляет собой базу для последующего этапа работы, предполагающего разработку методов по устранению деформации и усилению конструкций распорных систем при реставрации памятников архитектуры.

Список библиографических ссылок

1. Mario Como. Statics of Historic Masonry Constructions. Springer Series in Solid and Structural Mechanics. Vol. 5. 2016. 619 p.
2. Dahmen J. F. D., Ochsendorfs J. A. Earth masonry structures: Arches, vaults and domes. // Modern Earth Buildings. 2012, P. 427–460.
3. Yu J., Yu K., Shang X., Lu Z. New extended finite element method for pinching effect in reinforced concrete vaults // ACI Structural journal. 2016. № 113–04. P. 689–699.
4. Бессонов Г. Б. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. М. : Всесоюзное специализированное реставрационное производственное объединение «Союзреставрация». 1989. 171 с.
5. Павлов В. В., Хорьков Е. В. Восстановление работоспособности каменных арок и сводов // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 65–70.
6. Агафьева Т. С. Ансамбль Гродненского монастыря – памятник архитектуры XVI–XVIII века // Приокская глубинка: краеведческий альманах. 2012. № 4. С. 18–40.
7. Мерзлютина Н. А. Богоявленская (Симоновская) церковь города Юрьевца // Архитектурное наследие. 2015. № 62. С. 101–118.

8. Петропавловский собор. Раздел 1. Комплексные научные исследования. 2015 // Министерство культуры Республики Татарстан: официальный сайт. URL: http://mincult.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_366890.pdf (дата обращения: 27.03.2019).
9. Храмы России // URL: http://temples.ru/show_picture.php?PictureID=57705 (дата обращения: 27.03.2019).
10. Заброшенные церкви Татарстана (2 часть) // URL: <https://www.drive2.ru/l/4638868/> (дата обращения: 27.03.2019).

Ivanova Elena Yurevna

senior lecturer

E-mail: ivanova.e.u@mail.ru

Khabibulina Albina Gomerovna

candidate of economic sciences, associate professor

E-mail: albgomer@mail.ru

Khabibulina Adelya Maratovna

assistant

E-mail: adelya0514@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Vasileva Yuliya Vladimirovna

deputy director, expert of judicial construction and technical expertise, expert on state historical and cultural expertise

E-mail: gajavata@yandex.ru

LLC «Zabir»

The organization address: 420012, Russia, Kazan, Mayakovsky st., 30-17

Arched spacer systems from masonry material in the monuments of Russian religious architecture

Abstract

Problem statement. The purpose of this work is to analyze and summarize the results of research in the study of ancient coatings of masonry structure, namely the identification and classification of possible deformations and causes of these deformations in the spatial spacer systems of religious monuments of architecture, including in the administrative regions of the Republic of Tatarstan.

Results. Studies have allowed to establish under the influence of some factors is the deformability of a system. First of all, it is its design features, then, the properties of building materials from which the masonry is made, as well as the magnitude and nature of the load. The influence of deformability of supports on the working and inert parts of the arches and the role of enclosing walls, arches and air connections is determined.

Conclusions. The paper studies the deformation of all major types of coatings that occurred during their centuries-old operation, identifies the causes of their occurrence and presents the main ways to reduce the deformability of spacer systems. The most characteristic causes of deformations of the main types of systems are systematized, the places, directions and external signs of changes are determined, which is of great practical importance in the assessment of the technical condition, which is made before the restoration works. The presented results are relevant and have practical significance, as they allow experts to fully and accurately assess the state of the structures, to exclude erroneous conclusions, often occurring due to the lack of external manifestations of hidden defects and, thus, to avoid sudden collapses and accidents.

Keywords: vault, structural system, arch, analysis, strengthening, sustainability.

References

1. Mario Como. Statics of Historic Masonry Constructions. Springer Series in Solid and Structural Mechanics. Vol. 5. 2016. 619 p.
2. Dahmen J. F. D., Ochsendorfs J. A. Earth masonry structures: Arches, vaults and domes. // Modern Earth Buildings. 2012. P. 427–460.
3. Yu J., Yu K., Shang X., Lu Z. New extended finite element method for pinching effect in reinforced concrete vaults // ACI Structural journal. 2016. № 113-04. P. 689–699.
4. Bessonov G. B. Study of deformations, calculation of bearing capacity and structural strengthening of ancient spacer systems. M. : Specialized restoration of the all-Union production Association «Soyuzrestavratsiya». 1989. 171 p.
5. Pavlov V. V., Khorkov E. V. Restoration of working capacity of stone arches and vaults // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2017. №. 6 (65). P. 65–70.
6. Agafieva T. S. The ensemble of Grodnensky monastery – architectural monument XVI-XVIII century // Priokskaya glubinka : local history almanac. 2012. № 4. P. 18.
7. Merzlyutina N. A. Epiphany (St. Simon's) Church in Yurevets // Architecturnoe nasledstvo. 2015. № 62. P. 101–118.
8. Peter and Paul cathedral. Section 1. Complex research. 2015 // Ministry of culture of the Republic of Tatarstan: official website. URL: http://mincult.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_366890.pdf (reference date: 27.03.2019).
9. Temples Of Russia // URL: http://temples.ru/show_picture.php?PictureID=57705 (reference date: 27.03.2019).
10. Abandoned Church of the Republic of Tatarstan (part 2). URL: <https://www.drive2.ru/l/4638868/> (reference date: 27.03.2019).