

УДК 711.168

**Хабибулина Альбина Гомеровна**

кандидат экономических наук, доцент

E-mail: [albgomer@mail.ru](mailto:albgomer@mail.ru)

**Иванова Елена Юрьевна**

старший преподаватель

E-mail: [ivanova.e.u@mail.ru](mailto:ivanova.e.u@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

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

### **Пространственные покрытия с использованием распорных систем кладочной структуры**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Выявление и систематизация характерных деформаций распорных систем, определение характера и степени инженерного вмешательства, в процессе реставрации или консервации культовых сооружений.

*Результат.* Дан анализ работы сводов под действием разрушающих факторов. Выявлены резервы пространственных распорных систем кладочной структуры и возможности перестройки первоначальных рабочих схем в процессе многовековой эксплуатации. В работе представлены дублирующие схемы при различных видах деформаций; произведена систематизация характерных видов деформаций цилиндрических, крестовых, сомкнутых и крещатых сводов и выявлены традиционные места их локализации. Предлагаемый инженерно-аналитический подход к исследованиям технического состояния многовековых распорных систем может служить ориентиром при выработке реконструктивных мероприятий и определении объема и содержания реконструктивных вмешательств.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для архитектуры состоит в том, что выявленные закономерности и изменения рабочих схем распорных систем в процессе действия разрушающих факторов, дают возможность внести коррективы в традиционную методику исследований при оценке технического состояния распорных систем и расчетов, связанных с прогнозированием потери их устойчивости.

**Ключевые слова:** устойчивость, конструктивная схема, свод, арка, анализ, усиление, реконструкция.

#### **Введение**

Истоки возникновения распорных систем уходят в далекое прошлое. Основными покрытиями культовых зданий романской, византийской, а позднее готической и ренессансной архитектуры были арки и своды кладочной структуры. Глубоких исследований этих конструкций в те времена не было; размеры, формы, соотношения отдельных элементов определялись эмпирическим путем. Графоаналитические расчеты арок появляются лишь в XVIII-начале XIX веков. Исследования получили развитие к началу XX века в работах Н.К. Кривошеина, В.Р. Бернгарда, Н.К. Лахтина [1]. Однако, результаты этих исследований не дают исчерпывающую информацию, которая раскрыла бы особенности кинематики этих систем, т.к. базируются они на изучении поведения первоначальной рабочей схемы без учета специфики деформаций, возникающих в процессе эксплуатационных воздействий и разрушающих факторов.

Выводы, сделанные Н.К. Лахтиным, в отношении аркбутанов, парусов, сводов, подпружных арок и затяжек нельзя считать безусловными, т.к. учитывают только единственную равномерно распределенную вертикальную нагрузку и распространяются только на параболические своды.

Опыт возведения современных распорных систем [2, 3] при строительстве плотин, туннелей, метрополитена, ГЭС, пространственных покрытий общественных зданий использовать применительно к памятникам древности не корректно, т.к. нельзя отождествлять работу монолитной и кладочной структур. Используемый сегодня для

арок, сводов и др. металл и железобетон способны воспринимать напряжения разных знаков, в то время как конструкции из кирпича и камня могут воспринимать только усилия сжатия [4]. Отсюда вытекает актуальность поставленных в работе задач и практическая значимость их решения.

### Исследование распорной системы кладочной структуры сводов

Изучение механизма изменения начальной рабочей схемы в процессе многовековой эксплуатации распорных систем является определяющим направлением в исследовании проблем зависимости между распором, опрокидывающим, восстанавливающим моментами и комплексной технической характеристикой работы крестовокупольной системы. В частности, имеется большое количество примеров, когда пространственные покрытия утратили подпружные арки, часть вертикальных опор, связей и других подобных элементов, которые были определяющими элементами в первоначальной рабочей схеме и на сегодня далеки от обрушения [5, 6]. Сам факт существования таких конструкций в памятниках архитектуры приводит к выводу, что имеются скрытые резервы, позволяющие сохранить работоспособность распорных систем при частичном или полном преобразовании первоначальной рабочей схемы. Исследование конкретных объектов, таких как Большая трапезная палата Троицкого собора в Астрахани (1597-1603 гг.) (рис. 1) [7], Троицкий собор Выксунского Иверского монастыря [8], ансамбль Городненского монастыря [9] и другие позволили выявить конкретные потенциальные резервы. Назовем основные из них. Это монолитность кладки, снижение нагрузки на распорные элементы из-за твердения кладки и перезагрузки более жестких вертикальных опор, а также благодаря пространственной видоизменяемости криволинейных очертаний покрытий. Во множестве случаев [10, 11] мы имеем дело с завышенной толщиной сводов, что дает большой дополнительный запас прочности сжатой зоны. Несмотря на то, что общий распор системы при этом нарушается, покрытие сохраняет первоначальную форму. Это объясняется тем, что происходит перераспределение нагрузки, в процессе которого внутри конструкции образуются расчлененные пространственные безраспорные блоки.

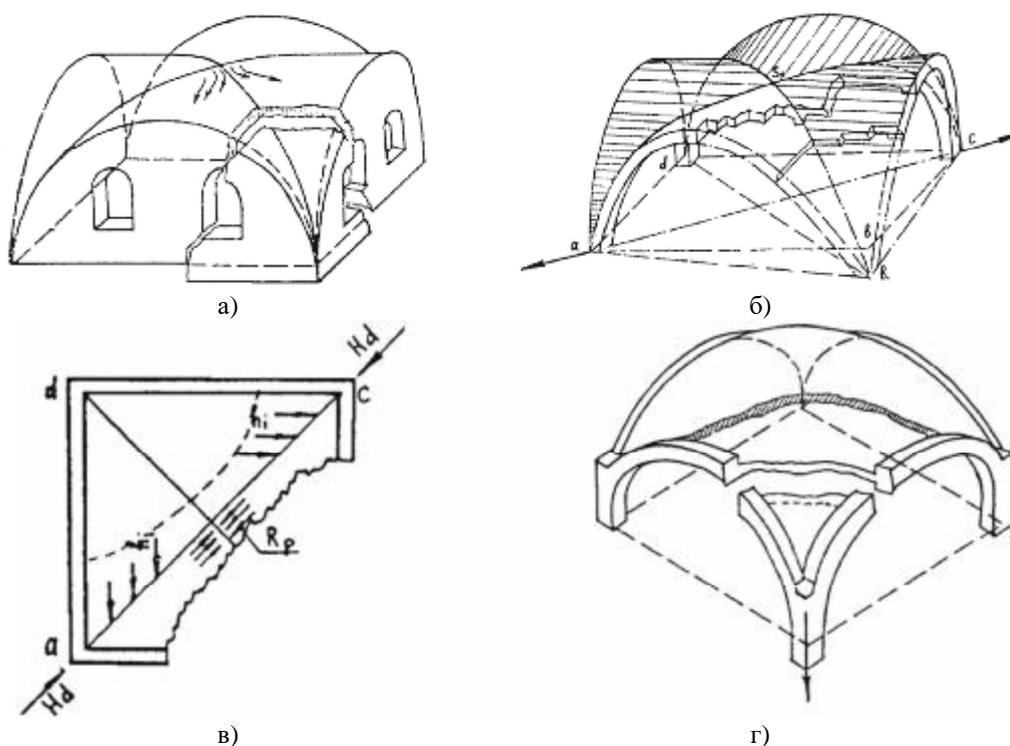


Рис. 1. Образование дублирующих схем:  
а, б, в – в крестовых сводах; г – в парусных сводах;  
 $R_p$  – сопротивление раствора в растянутой зоне кладки

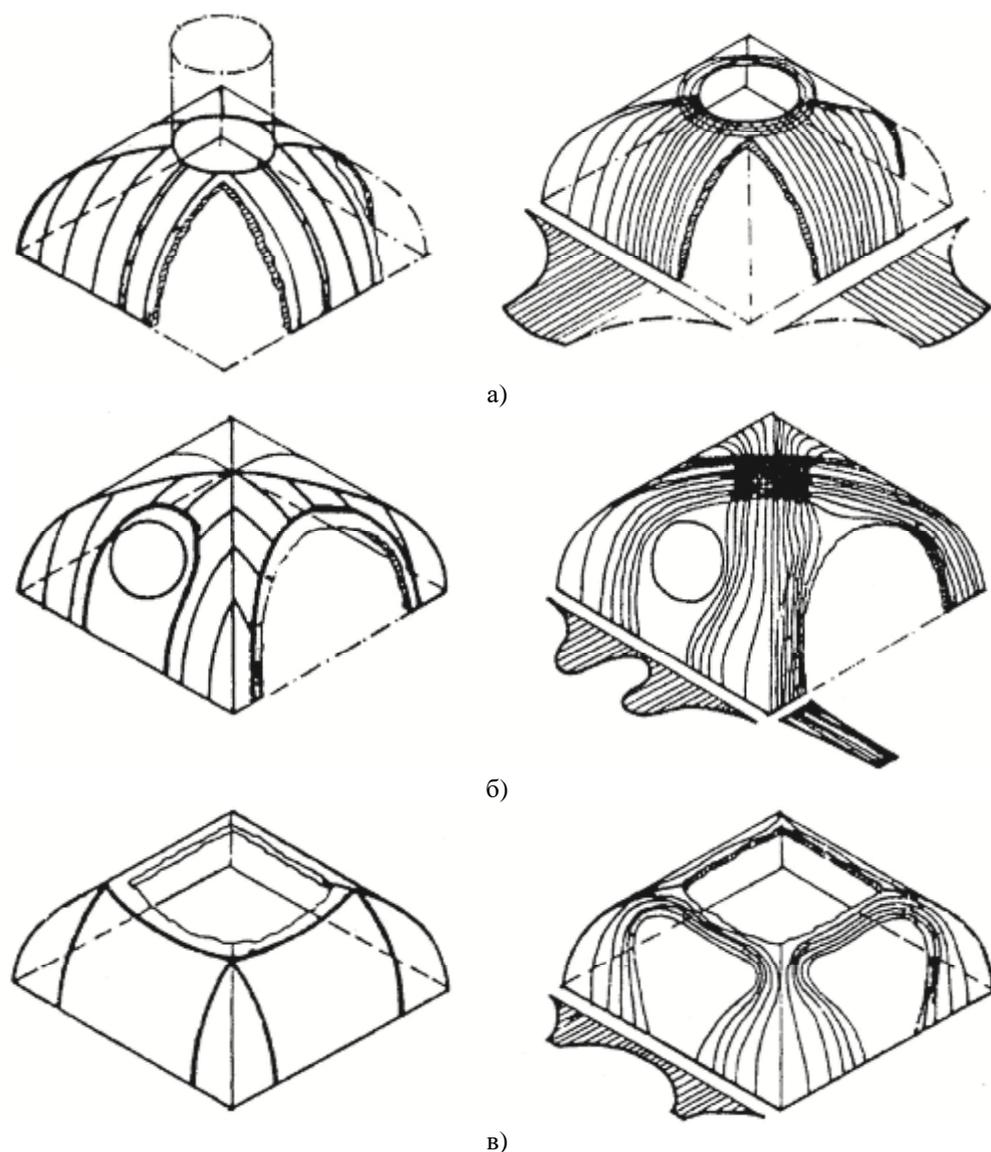


Рис. 2. Дублирующие схемы модели напряженного состояния и эпюры распора сомкнутого свода:  
а – при обрушении угла; б – при обрушении лотка;  
в – при обрушении центральной лотковой части

### Рабочие схемы распорной системы сводов

Рассмотрим более детально механизм видоизменения первоначальных основных и дублирующих рабочих схем. В процессе эксплуатации рабочая схема распорной системы меняется в соответствии с техническим состоянием конструкции. Возможны три таких состояния: начальное, усложненное и критическое, за которым уже следует ожидать обрушение. Им свойственна основная, дублирующая (рис. 1-2) или одновременно обе рабочие схемы. Но при этом следует отметить, что объем работы, выполняемой основной и дублирующей схемами различен. Так, по мере увеличения деформаций элементов основного направления этот объем постоянно возрастает. Подтверждением вышесказанного служит исследование впадушенного свода центрального нефа Благовещенского собора в Нижнем Новгороде [5], где при критическом состоянии системы дублирующая рабочая схема, работающая в продольном направлении, обеспечила устойчивость свода. Такая перестройка весьма согласуется с существующими теоретическими понятиями расчета, согласно которым давление передается нормально к поперечным или продольным швам кладки. Однако надо отметить, что несколько иная картина раскрывается в перевязанной кладке, которая берет на себя усилия сдвига вдоль швов. Здесь изменение рабочей схемы возникает из-за ступенчатого, косо перераспределения нагрузки на соседние участки под определенным

углом к швам того или иного направления. От перевязки кладки во многом зависит как будут перераспределяться усилия при различных воздействиях, изменяющихся в процессе эксплуатации, при повышенных нагрузках. Главное влияние на успешное перераспределение нагрузок и комплексную работу прилегающих друг к другу элементов оказывают три фактора: 1) монолитность кладки, 2) ее прочность и 3) насколько сильна перевязка швов. В том случае, когда хотя бы один из этих факторов не учитывался экспертами, мы встречаем ошибочные заключения специалистов о перспективном развитии деформаций и сроках наступления критической, предаварийной стадии в состоянии распорной системы [9].

### **Анализ примеров работы дублирующих схем сводов при деформациях**

Характерно, что в сомкнутых, коробовых и лотковых сводах не возникают точечные концентрации распора и давления. Благодаря этому они более чувствительны к деформациям лотков, просадкам столбов и несущих стен и к местным повреждениям. Такое свойство перераспределять нагрузку, переносить ее с центральной части на углы давало возможность устраивать проемы, люки, распалубки, отверстия барабанов.

Характерным примером работы дублирующей схемы при обрушении: а) лотка; б) угла; в) центральной лотковой связи может служить сомкнутый свод церкви Рождества в Городне [10]. Обрушение углового блока не нарушило устойчивость, т.к. рабочая схема не изменила своего характера. При обрушении центральной лотковой части равновесие было обеспечено тем, что сохранившаяся часть лотка, соседствующая с ребром, противодействовала распору (рис. 2). Кроме того, имела место надежная, усиленная перевязка с кладкой и малая величина пролета при консольной схеме работы.

При обрушении замковой части свода, кроме вышеперечисленных причин равновесия системы, немаловажное значение приобретают силы продольного обжатия участков свода, которые непосредственно примыкают к отверстию.

Анализ различных примеров [11] показывает, что дублирующие схемы, позволяющие избежать обрушения свода, возникают в подъемистых сводах при малом их пролете. Монолитность кладки должна обеспечить работу отдельных элементов рабочей схемы как безраспорным конструкциям. Усилия изгиба, возникающие в кладке, сводятся на нет за счет сцепления раствора. На примере парусных и крестовых сводов можно наблюдать, как образовавшиеся дублирующие схемы позволяют сохранить первоначальную рабочую схему при деформациях столбчатых опор, таких как осадка или сдвиг, до тех пор, пока обжатие диагонали и сцепление раствора будут сводить на нет сдвигающие и растягивающие усилия от изгиба. Иллюстрацией того, что при деформации основания, обрушении ребра или части свода, распалубки сохраняется равновесие системы, могут служить примеры Преображенского и Благовещенского соборов в Нижнем Новгороде [11]. Объяснение этому одно – это сильно перевязанная жесткая кладка.

В случае просадки центральной опоры в трапезной палате Троицкого собора в Архангельске подпружные арки, опирающиеся на нее, отделились от сводов, испытавших одностороннее воздействие. Но рабочая схема при этом сохранилась (рис. 3-4).

Из вышеизложенного исследования следует, что действительный распор распорных систем кладочных конструкций меньше теоретического распора. За счет сцепления раствора кладка воспринимает сопротивление в растянутой зоне и работает на балочной схеме. Иначе говоря, кладка берет на себя вертикальные усилия, а опоры, как и любая балка криволинейной формы, освобождаются от горизонтальных воздействий (рис. 4).

Распор кирпичной арки кладочной структуры обычно меньше, чем теоретически подсчитанный из-за того, что часть балочного момента гасится действием внутренней пары:

$$M' = R_p \cdot h_p \cdot z,$$

где  $R_p$  – расчетное сопротивление растяжению раствора при изгибе по перевязанному сечению;  $h_p$  – величина растянутой зоны сечения;  $z$  – плечо внутренней пары.

Истинный распор кирпичной арки  $H'$  следует определять по формуле:

$$H' = \frac{M_6 - M'}{f};$$

где  $M_6$  – балочный момент от нагрузки;  $f$  – длина стрелы арки.

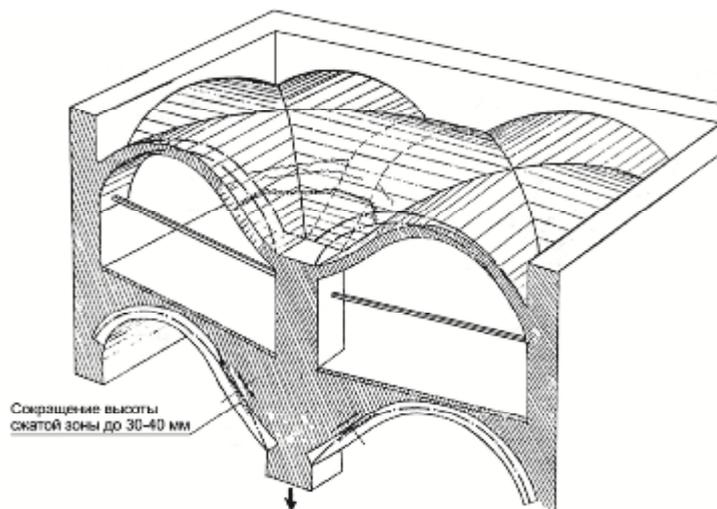


Рис. 3. Схема деформации системы крестовых сводов, при просадке центрального столпа, с сохранением начальной рабочей схемы (Большая трапезная палата Троицкого собора в Астрахане 1597-1603 гг.)

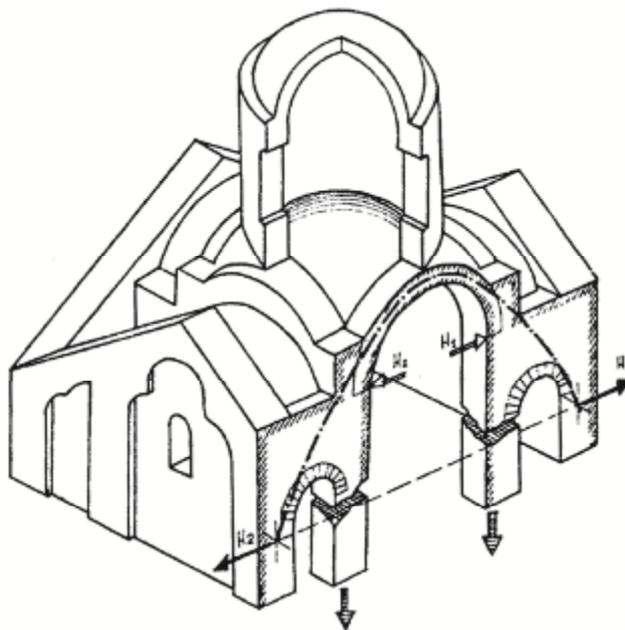


Рис. 4. Формирование дублирующей бесстолпной рабочей схемы в связи с потерей центральных опор

Полученные выводы практически значимы, т.к. если не учитывать различия в величинах действительных и теоретических распоров подпружных центральных арок, то это может привести к ошибкам при оценке технического состояния крестово-купольных систем, при прогнозировании его изменения и выработки рекомендаций по реконструкции и консервации памятника архитектуры. Авторами была выполнена систематизация основных видов деформаций распорных систем покрытий культовых сооружений.

Независимо от типа сводов, зоны с максимальными сдвигающими или растягивающими напряжениями, являются слабым звеном системы. Здесь в местах стыковки деформационных блоков, в местах расположения технологических швов, а также на участках, где имеются слабые перевязки швов, возникают продольные трещины. В отличие от них второй тип трещин перпендикулярен плоскости деформаций. Для различных типов сводов характерны свои места расположения трещин.

Обобщая опыт, приходим к следующему заключению. В крестовых системах при сдвиге и просадке опор характерно появление трещин вдоль ребра, поперек подпружных

арок, вблизи опор, перпендикулярно диагональному ребру; при наличии провисания замковой части трещины возникают вокруг нее, а также вдоль оси распалубок.

В цилиндрических системах трещины в основном наблюдаются на нижних поверхностях или по линии смыкания в угловых участках, в местах соприкосновения с распалубками или непосредственно около центральных просевших столбов.

Если нет воздушных связей, то трещины в крещатых сводах возникают на наружной стороне центральных арок на уровне:

$$\frac{2}{5}l, \frac{1}{2}l,$$

где  $f$  – расчетная длина стрелы арки; а также между угловыми участками свода и центральными арками.

Аналогично, на наружной поверхности в тех же зонах, характерно возникновение трещин и в сомкнутых системах, только в несколько другом диапазоне уровней:

$$\frac{1}{3}l, \frac{1}{2}l \text{ от пяты свода.}$$

Традиционный вид трещин и появление раскрытых швов наблюдаем при хрупкой деформации, возникающей в сухой кладке, выполненной на известковых и сложных растворах низких марок. При наличии высокопрочных растворов по мере нарастания усталостной деформации возрастают скачкообразно. Важно учитывать тот факт, что при пластичной кладке с повышенной влажностью трещины могут не образовываться вплоть до потери равновесия системы и обрушения свода.

Обращает на себя внимание исследования зарубежных ученых по компьютерному моделированию устойчивости каменных сводов с учетом статических и динамических нагрузок [12].

### Заключение

В данном исследовании проявлен инновационный подход, отличающий его от существующих аналитических разработок тем, что базируется на инженерной специфике причин технического износа, а не на описании наблюдаемых локальных дефектов. Материальная ориентация работы позволяет выявить скрытые причины деформаций, характерные только для кирпичных и каменных сводов, выполненных с использованием технологий возведения и специальных рецептур растворов, применявшихся в сводах, оболочках и арках культовых сооружений.

Систематизация характерных видов деформаций сводов, определение действительного распора кирпичных и каменных систем, выявление резервов распорных систем за счет различных типов дублирующих схем представляет практический интерес и дает возможность внести коррективы в устоявшуюся практику оценки технического состояния конструкций и выработки экспертных рекомендаций по реконструктивным мероприятиям.

### Список библиографических ссылок

1. Лахтин Н. К. Расчет арок и сводов. СПб. 1911. 106 с.
2. Talley K. G., Kapitan J. G., Breen J. E. Method for approximation of ASR/DEF damage in vaults // ACI Structural journal. 2016. № 113-01. P. 105–110.
3. Bonetti R., Wollman R., Sandos J.T. Bearing strength of confined concrete // ACI Structural journal. 2015. № 3-06. P. 1317–1328.
4. 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.
5. Балковски Ф. Д. Сонирование исторических зданий. М. : Стройиздат. 2011. 106 с.
6. Павлов В. В., Хорьков Е. В. Восстановление работоспособности каменных арок и сводов // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 65–70.
7. Изоркин А. В. Ядрин: исторический очерк. Чебоксары : Калем. 2013. 232 с.
8. Давыдов А. И. Троицкий собор Выксунского Иверского монастыря // Приокская глубинка: краеведческий альманах. 2008. № 3. С. 41–50.

9. Мерзлютина Н.А. Богоявленская (Симоновская) церковь города Юрьевца // Архитектурное наследие. 2015. № 62. С. 101–118.
10. Агафьева Т. С. Ансамбль Гародненского монастыря – памятник архитектуры XVI-XVIII века // Приокская глубинка: краеведческий альманах. 2012. № 4. С. 18–40.
11. Свод памятников архитектуры и монументального искусства России. Владимирская область в 6 ч. Ч. 1. М. : Наука. 2000. 813 с.
12. Valentina B., Gianni R.-C., Alessandro T. The role of frictional contact of constituent blocks on the stability of masonry domes // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. January 2018. Vol. 474, Iss. 2209. P. 1–21.

**Khabibulina Albina Gomerovna**

candidate of economic sciences, associate professor

E-mail: [albgomer@mail.ru](mailto:albgomer@mail.ru)

**Ivanova Elena Yurevna**

senior lecturer

E-mail: [ivanova.e.u@mail.ru](mailto:ivanova.e.u@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenayast., 1

### Spatial coverage with the use of thrust systems masonry structures

**Abstract**

*Problem statement.* Identification and systematization of characteristic deformations of spacer systems, determination of the nature and degree of engineering intervention, in the process of restoration or conservation of religious buildings.

*Results.* The analysis of work of arches under the influence of destructive factors is given. The reserves of spatial spreading systems of the masonry structure and the possibility of reconstructing the initial working patterns in the process of centuries-old exploitation are revealed. The paper presents duplicating schemes for various types of deformation; systematization of characteristic types of deformations of cylindrical, cross, closed and baptismal arches was carried out and traditional places of their localization were revealed. The proposed engineering-analytical approach to researching the technical state of centuries-old spacer systems can serve as a reference point for the development of reconstructive measures and the determination of the scope and content of reconstructive interventions.

*Conclusions.* The significance of the obtained results for the architecture is that the revealed regularities and changes in the working schemes of the spacer systems in the process of action of the destructive factors make it possible to make corrections to the traditional research technique in assessing the technical state of the spacer systems and calculations related to predicting the loss of their stability.

**Keywords:** stable, constructive scheme, vault, arch, analysis, reinforcement, reconstruction.

**References**

1. Lakhtin N. K. Calculation of arches and vaults, SPb. 1911. 106 p.
2. Talley K. G., Kapitan J. G., Breen J. E. Method for approximation of ASR/DEF damage in vaults // ACI Structural journal. 2016. № 113-01. P. 105–110.
3. Bonetti R., Wollman R., Sandos J. T. Bearing strength of confined concrete // ACI Structural journal. 2015. № 3-06. P. 1317–1328.
4. 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.
5. Balkovski F. D. Sanitation of historic buildings. M. : Stroiizdat. 2011. 80 p.

6. Pavlov V. V., Khor'kov E. V. Restoration of working capacity of stone arches and vaults // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2017. № 6 (65). P. 65–70.
7. Izorkin A. V. Yadrin: historical review. Cheboksary : Kalem. 2013. 232 p.
8. Davidov A. I. The Trinity Cathedral of Vyksa Iversky monastery // Priokskaya glubinka : almanac of local lore. 2008. № 3. P. 41–50.
9. Merzlyutina N. A. Epiphany (St. Simon's) Church in Yurevets // Architecturnoe nasledstvo. 2015. № 62. P. 101–118.
10. Agafieva T. S. The ensemble of Garodnensky monastery – architectural monument XVI-XVIII centuries // Priokskaya glubinka: kraevedcheskiy almanakh. 2012. № 4. P. 18–40.
11. Set monuments and monumental art in Russia. Vladimir region in 6 v. V. 1. M. : Nauka. 2000. 813 p.
12. Valentina B., Gianni R.-C., Alessandro T. The role of frictional contact of constituent blocks on the stability of masonry domes // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. January 2018, Vol. 474. Iss. 2209. P. 1–21.