



УДК 711.168

**Т.А. Крамина** – доцент

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)**

## **АРОЧНЫЕ И СВОДЧАТЫЕ СИСТЕМЫ В ПАМЯТНИКАХ АРХИТЕКТУРЫ ДРЕВНЕЙ РУСИ**

### **АННОТАЦИЯ**

В статье представлены результаты исследований распорных систем в памятниках архитектуры Древней Руси. Дан анализ работы арочных и сводчатых конструкций, подвергшихся воздействию долгосрочных факторов, отрицательно повлиявших на сохранность архитектурных форм, свойства строительных материалов и несущую способность конструкций. Рассмотрены причины аварийных ситуаций и конкретные пути снижения распора в арочных и сводчатых системах, что помогает реставратору решать целый ряд задач по разработке реконструктивных мероприятий с учётом всех дефектов, имеющихся в древней конструкции на сегодняшний день и даже прогнозируемых на ближайшее будущее.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Реконструктивные мероприятия, распорные системы, пространственная устойчивость, арочные и сводчатые конструкции.

**T.A. Kramina** – associate professor

**Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**

## **ARCH AND VAULT CONSTRUCTION FUNCTIONING IN ARCHITECTURE MONUMENTS OF ANCIENT RUSSIA**

### **ABSTRACT**

In present work the results of strut system investigations in architecture monuments of Ancient Russia are given. The analysis of arch formed constructions, worked under the long-term influence of a number of factors that had a negative impact on the retention of architecture forms, construction material characteristics and construction bearing capacity is conducted. The reasons of emergency situations and the possibilities to decrease the strut power in arch formed constructions are considered. The findings of the present work help the restaurateur to solve many tasks on reconstructive measures workout with taking into consideration all ancient construction defects and future defect dynamics forecasting.

**KEYWORDS:** Reconstructive measures, strut system, arch formed constructions, defect dynamics forecasting, retention of architecture forms, architecture monuments of Ancient Russia.

В процессе реконструкции сложных объектов культурного наследия приходится решать целый ряд локальных архитектурных, конструктивных и планировочных задач. В данной работе рассмотрены особенности деформаций одной из древних распорных систем.

Исследования, проведённые на сегодняшний день в области арочных и сводчатых конструкций, не являются достаточными для проведения реставрационных работ и требуют дальнейшего углубления, т.к. не учитывают специфики эксплуатационных воздействий, которые зачастую влекут за собой не только деформации, но и перераспределение нагрузки, вызывая изменение первоначальной конструктивной схемы объекта.

Исходя из этого, целесообразным следует считать рассмотрение вопросов, связанных с анализом многовековой работы арочных систем в памятниках древнерусской архитектуры, выполненным применительно к целям реставрационных работ.

Арки и своды, появившись в Древнем Риме, являлись главным видом покрытий в римской, византийской, романской, готической и ренессанской архитектуре вплоть до появления металла и железобетона в арсенале зодчих. Однако исследования этих конструкций носили эмпирический характер и ставили целью опытным путём получить наиболее оптимальные формы, размеры и соотношения частей в распорных системах. Теоретические исследования такого рода конструкций появились сравнительно



недавно, в XVIII-начале XIX веков. В них можно найти анализ опыта арок и сводов в древние эпохи и графоаналитические расчёты плоской клиновой арки. Более глубокие исследования распорных систем относятся ко второй половине XIX-началу XX веков, среди них труды В.Р. Бернгардта, Н.К. Кривошена, Н.К. Лахтина [3]. Однако в этих работах рассматривается первозданное состояние конструкций, при этом не затрагивается специфика работы деформированных в процессе эксплуатации систем. Нет в них и диагностики деформаций, не учитывается влияние монолитности кладки на устойчивость формы и прочие вопросы, связанные с особенностями кинематики распорных систем.

В разработанном Н.К. Лахтиным «Руководстве к аналитическому расчёту арок и сводов» рассмотрены все основные части подпружных арок, аркбутанов, парусов, сводов и затяжек. Однако, выводы и рекомендации учёного следует считать условными, т.к. сделаны они из предположения, что своды имеют параболическую форму, кроме того, произведён учёт только одной вертикальной равномерно распределённой нагрузки.

В связи с внедрением в практику современного строительства новых строительных материалов и методов возведения арок и сводов в последнее время проведено большое количество исследований, посвящённых вопросам статики распорных систем в конструкциях метрополитена, туннелей, плотин, ГЭС, покрытиях большепролётных зданий и др.

Однако, несмотря на внешнее сходство форм вышеперечисленных конструкций с распорными системами памятников старины, воспользоваться расчётами, рекомендациями и методиками оценки технического состояния, выполненными современными учёными применительно к железобетонным сводам, не представляется возможным. Причина этого заключается в различии между свойствами монолитной и кладочной структуры. В то время, как монолитный железобетон и металл воспринимают напряжения разных знаков, кладка, выполненная из камня или кирпича, способна воспринимать лишь сжимающие напряжения. Только в случаях повышенных прочностных характеристик раствора кладка воспринимает незначительные растягивающие усилия. В зависимости от качества перевязки кирпичей и свойств раствора нагрузка в процессе деформации конструкции может лишь частично перераспределиться вдоль кладочного свода, в то время как железобетонный или металлический свод в тех же самых условиях передают напряжения на большие соседние участки, благодаря продольной арматуре, способной воспринимать растягивающие усилия.

Первые каменные храмы на Руси появляются в X веке и представляют собой крестово-купольную систему, конструктивную основу которой составляет трёх- или

пятипролётная арочно-стоечная система, делящая внутренний объём на центральные и боковые нефы. Главные подпружные балки, несущие центральный световой барабан и боковые подпружные арки, служащие основанием для коробовых или крестовых сводов, передают нагрузку на четыре центральных столба. Они делят пространственную систему перекрытия в плане на отдельные модули, которые в зависимости от размера и нагрузки вызывают большие или меньшие распоры, направленные навстречу друг другу. Складываясь или вычитаясь, они создают суммарный неуравновешенный распор, действующий в плоскости подпружных арок продольного или поперечного направления или в диагональных плоскостях. Этот распор передаётся на вертикальные опоры: столбы, колонны, наружные стены, работающие независимо друг от друга или совместно, будучи объединёнными в плоские и объёмные диафрагмы жёсткости. Немаловажное значение имеет совместная работа вертикальных элементов жёсткости с горизонтальной жёсткостью внешнего опорного контура при условии, что в монолитных тонкостенных конструкциях отсутствуют трещины. Плоская многопролётная система является уравновешенной, если опрокидывающее действие распора, передающееся к элементу жёсткости, меньше удерживающей реакции собственного веса и нагрузки, воспринимаемой данным элементом, приложенным с соответствующим плечом относительно точки опрокидывания. В том случае, когда распор превышает эту величину, для поддержания равновесия крестово-купольной системы необходимо либо устанавливать воздушные связи, располагая их в уровне пят подпружных арок, либо использовать внешние дополнительные элементы, такие как: апсиды, контрфорсы, пристройки и др. Ошибочно было бы переоценивать роль воздушных связей в обеспечении начальной пространственной жёсткости, т.к. нельзя не учитывать собственную жесткость опорного контура и эффект сцепления раствора. Однако в процессе эксплуатации, когда возникают деформации древних распорных конструкций, воздушные связи включаются в активную работу.

На начальных и последующих периодах строительства на Руси храмов с использованием крестово-купольных систем происходили серьёзные деформации и многочисленные аварии, такие как обрушение сводов, барабанов, падение вертикальных опор и др. [1]. При этом необходимо отметить, что объекты являлись аналогами византийских сооружений гражданской, культовой и оборонной архитектуры, возведённых несколько тысяч лет тому назад и отлично себя зарекомендовавших как безотказные и долговечные системы. Анализируя этот опыт, приходишь к выводу, что выработанные в Европе оптимальные параметры крестово-купольных сооружений не явились гарантией надёжности при их



механическом перенесении в иной масштаб, с использованием других строительных материалов при специфических грунтовых условиях и прочих особенностях российских построек. Опыт возведения и эксплуатации на Руси взаимствованных образцов распорных систем позволил выработать свои российские строительные приёмы и методы возведения, которые были адаптированы к климатическим, гидрогеологическим условиям с учётом применения местных строительных материалов. Чтобы обеспечить длительное безаварийное существование арочных систем из кладочного материала, были снижены напряжения во всех элементах, исключены растягивающие усилия и обеспечена малая чувствительность конструкции к влиянию внешней среды, что предопределяется либо самим характером конструкций, либо природными условиями места строительства [2].

Рассматривая сохранившиеся до наших времён ранние русские памятники, приходишь к выводу о существовании общих конструктивных признаков, позволявших обеспечить столь большую долговечность объектов. Это:

- малые пролёты центральных и боковых подпружных арок;
- устройство диафрагм или модулей жёсткости;
- снижение суммарного «неуравновешенного» распора системы;
- освобождение воздушных связей от значительных усилий;
- достижение малого интервала напряжений в кладке несущих конструкций и в основании фундаментов.

Со времени возведения первых наиболее значительных и дорогих соборов Древней Руси, таких как Новгородский, Георгиевский собор Юрьева монастыря, церкви Михаила Архангела в Смоленске и др., вплоть до строительства московских кремлёвских соборов крестово-купольная система претерпела большие изменения, продиктованные градостроительными, идеологическими, утилитарными и финансовыми условиями. По характерным конструктивным признакам их можно разделить на рядовые арочно-стоечные системы, перекрытые сводами в одном уровне с центральными подпружными арками; системы с повышенными центральными подпружными арками и системы с пониженными углами.

Продольная ориентация угловых сводов способствует сбору нагрузок преимущественно на подпружные арки продольного направления, передающие распор на главные жесткостные элементы объёма – апсиды. Внутренними элементами жёсткости служат диафрагмы, образуемые жёстким соединением близко поставленных столбов и наружных стен с помощью двух ярусов арочных перемычек или сплошного заполнения. В шестистопных соборах

дополнительной жёсткостью являются подпружные арки и столбы западного модуля.

В связи с тем, что боковые подпружные арки, несущие цилиндрические своды рукавов креста, располагаются ниже центральных подпружных арок, распор последних воспринимается ими как горизонтальная нагрузка. Суммарный распор при этом опускается на уровень пят боковых арок.

Существует ещё один способ снижения общего распора крестово-купольной системы. Он заключается в том, что часть распора сводов креста передаётся на угловые пониженные и, следовательно, наиболее жёсткие части объёмной конструкции.

Рассмотренные методы позволяют снизить распор в 1,5-2 раза, что даёт возможность значительно увеличить высоту зданий [2]. Однако нельзя не учитывать тот факт, что деформации, происходившие в процессе эксплуатации и просадки центральных столбов, зачастую обуславливали передачу нагрузки от высокоподнятого барабана непосредственно на наружные стены или опущенные углы, минуя центральные вертикальные опоры. Примером могут служить деформации, произошедшие в церкви Прокопия в Новгороде. Пониженные угловые своды нашли применение в памятниках Смоленска и Новгорода, построенных в XII веке – церковь Михаила Архангела, Рождества в Перыни. Повышенные подпружные арки и ступенчатые своды использовались в черниговской Пятницкой церкви, в псковских и московских постройках. Наибольшее распространение они получили в XIV-XVI вв. Это церковь Спаса на Ильине в Новгороде, Спасский собор Андронникова монастыря, собор Рождества Богородицы Саввино-Строжевского монастыря.

Среди сооружений XVI-XVII вв. преобладают крупные четырёх-, шестистопные пятиглавые соборы крестово-купольной системы, перекрытые коробовыми сводами. Это Архангельский собор Московского Кремля, Успенский собор в Дмитрове, Смоленский собор Новодевичьего монастыря, Софийский собор в Вологде и др., отличавшиеся значительно возросшими размерами общей площади и высоты. Это стало возможным благодаря развитию строительной техники и освоению новых приёмов и методов производства работ. Обеспечение пространственной жёсткости становится для таких сооружений особо сложной задачей, т.к. напряжения в кладке конструкций и основания, сам распор и его опрокидывающее действие резко возрастают.

В соборах, лишённых диафрагм, притворов, пониженных углов и других элементов жёсткости, для противодействия резко возросшему распору возникает необходимость в облегчении перекрытия за счёт снижения его толщины (в 1 кирпич), пригрузке угловых частей здания весом барабана и включением в более активную работу элементов связевого каркаса. С этой же целью нередко использовался приём обстройки



здания галереями. Роль воздушных связей как элементов устойчивости распорной системы резко возрастает, мало того, начинают применять парные связи.

Фактором, сдерживающим увеличение параметров сооружений, являлась несущая способность кирпича, белого камня и основания. Для увеличения прочности кладки в пяты и замки арок, в опорные кольца барабанов и цоколи столбов закладывали вставки из более прочного материала.

С увеличением объёмов сооружений возрастала нагрузка на основания, достигая 0,3-0,6 МПа, в лучшем случае она была предельной, но чаще превышала допустимую величину в 1,5-3 раза [1]. Крестово-купольные системы подвергались в этих условиях деформациям, вызванным большой величиной и неравномерностью просадок грунта. Фундаментные ленты и подушки из мелкогабаритных элементов не обеспечивали равновесие системы «Фундамент-основание». Необходимо было увеличить площадь фундаментов или же применять искусственное укрепление слабого основания забивкой коротких (1,0-1,5 м) деревянных свай по всей площади застройки.

В соборах конца XVII века крестово-купольная система достигла наивысшего развития, образцом могут служить такие соборы, как Успенский в Рязани, Троицкий в Пскове и Успенский в Астрахани. Их размеры и конструктивное совершенство было превзойдено только после освоения подъёмно-транспортных механизмов, паровых копров, внедрения техники механической обработки металла и камня; использования цементного раствора и армирования кладки.

Это сооружения, возведённые уже в XIX веке: Исаакиевский собор в Санкт-Петербурге, храм Христа спасителя в Москве и др.

Таким образом, для решения проблемы диагностики деформаций и сохранения распорных конструкций в памятниках Древней Руси необходимо комплексное исследование, первый этап которого представлен в данной статье. Здесь дана классификация основных типов распорных систем и рассмотрено их развитие, а также проблемы, возникавшие на каждом этапе этого развития. Особое внимание уделено анализу деформаций и аварийных ситуаций и выявлению причин, их вызвавших.

На основе анализа работы распорных систем и их отдельных элементов под действием нагрузок в процессе эксплуатации предложены мероприятия, обеспечивающие устойчивое состояние конструкции. Рассмотренные принципы снижения уровня распора в системах с подвешенными подпружными арками или с пониженными углами рекомендуется использовать для создания пространственной жёсткости и равновесия крестово-купольных сооружений, роль воздушных связей при этом должна быть определена в строгой зависимости от параметров сооружения, особенностей конструктивного решения, деформаций и пр. Выявление зависимости между распором, опрокидывающим, восстанавливающим моментами и комплексной характеристикой крестово-купольной системы являются при этом определяющим фактором.

### Литература

1. Балковский Ф.Д. Санитарное историческое зданий. – М.: Стройиздат, 2002. – 80 с.
2. Исследование деформаций, расчёт несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. Методические рекомендации. – М.: Изд-во «Росреставрирование», 1989. – 282 с.
3. Лахтин Н.К. Расчёт арок и сводов. – СПб., 1911. – 106 с.