

УДК 624.042.1

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
МОНОЛИТНЫХ УЗЛОВ СОПРЯЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК**

*Артюшин Дмитрий Викторович,*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции».*

*Шумихина Виктория Андреевна,*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*магистрант.*

*Азимова Яна Александровна,*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*магистрант.*

**Аннотация**

Приведены результаты исследований физической работы монолитных узлов сопряжения большепролетных железобетонных балок с предварительным напряжением. Предложены расчетные модели и аналитические зависимости сопротивления продольных и поперечных балок и монолитных узлов их сопряжения. Предлагается новый метод армирования балок и узлов их сопряжения.

**Ключевые слова:** узлы сопряжения железобетонных балок, экспериментальные исследования, стержневая и каркасно-стержневая модели, расчетные усилия, прочность.

**EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL RESEARCHES OF MONOLITHIC  
KNOTS OF COUPLING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS**

*Artyushin Dmitriy Viktorovich,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Building constructions».*

***Shumikhina Victoria Andreevna,***

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza, undergraduate.*

***Azimova Yana Aleksandrovna,***

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza, undergraduate.*

## **Abstract**

Results of researches of a physical activity of monolithic knots of coupling of prestressed reinforced concrete beams with big flights are given. The settlement models and analytical dependences of resistance of longitudinal and cross beams and monolithic knots of their coupling are offered. A new method of reinforcing beams and knots of their coupling is also offered.

**Keywords:** knots of coupling of reinforced concrete beams, experimental researches, rod and frame-rod models, settlement efforts, durability.

На кафедре строительных конструкций ПГУАС накоплен большой опыт системного исследования железобетонных конструкций при действии поперечных сил. Имеется в виду целый класс коротких элементов, который включает в себя короткие консоли колонн, короткие тяжело нагруженные балки и их разновидности, приопорные участки обычных и длинных балок, узлы сопряжения несущих конструкций, ростверки свайных фундаментов под стены и колонны, высокие, обычные и низкие стены при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил и целый ряд других конструкций. Создана обширная экспериментальная база и разработаны эффективные методы расчета указанных выше конструкций, основу которых составляют расчетные стержневые и каркасно-стержневые модели [1–7]. Методология их построения

базируется на принципе копирования напряженно-деформированного состояния исследуемых конструкций.

В данной статье анализируются результаты экспериментально-аналитических исследований характера сопротивления монолитных узлов сопряжения большепролетных балок покрытий и перекрытий, их вида разрушения и картины трещинообразования. Программа предусматривала предварительную систематизацию результатов крупных отечественных и зарубежных исследований. Выяснилось, что в нашей стране проводились единичные испытания узлов соединения конструкций. Среди зарубежных выделены и систематизированы испытания **H**-образных фрагментов соединения продольных и поперечных балок, проведенные в Штуттгартском Университете под руководством профессора Fritz Leonhardt.

Для преемственности и создания единого подхода по оценке прочности в нашу программу была включена серия испытаний фрагментов узлов сопряжения балок, по форме аналогичных испытанным в Германии. При этом, в схему армирования узлов балок были введены сосредоточенные хомуты, точнее – пакеты хомутов. Испытания показали, что наличие такого рода хомутов в соединении с продольной арматурой образуют, условно говоря, промежуточные специфические опоры. Они в значительной степени изменяют характер напряженно-деформированного состояния балок и узлов их соединения. Эти опоры трансформируют траектории и эпюры главных сжимающих и растягивающих напряжений, а также создают зоны их концентрации. Траектории напряжений концентрируются в пределах армированных полос бетона, расположенных между верхними и нижними узлами сопряжения пакетов хомутов и продольной арматуры. Одновременно усиливается другая функция сосредоточенных хомутов, повышается прочность наклонных сечений в такой степени, что определяющую роль при расчете и эксплуатации начинают играть растянутые и сжатые полосы бетона, имеющие соответствующую арматуру.

Экспериментальные исследования узлов сопряжений включали в себя изучение целого ряда факторов, основными из которых являются схемы эффективного армирования, различные формы сечений стыкуемых элементов, расстояния приложения сосредоточенных сил относительно оси опоры, схемы и характер нагрузений. Ставилась цель оценить характер разрушения узла сопряжения продольных и поперечных балок из серии **H**-образных фрагментов с предварительным напряжением балок, а также при отсутствии и наличии сосредоточенных хомутов. Продольные и поперечные балки принимались таврового сечения высотой 100 см. В продольных балках понизу предусматривались утолщения для размещения двух продольных предварительно напряженных стержней. В поперечных балках, воспринимающих внешнюю сосредоточенную силу, два из четырех предварительно напряженных стержня отгибались в приопорной части в сторону верхней грани балки. В узлах сопряжения эти стержни смещались на высоту 25 см относительно осей продольных стержней. В первой серии **H**-образных фрагментов стенки балок армировались сетчатыми каркасами с продольными и вертикальными хомутами. Во второй серии фрагментов использовались сосредоточенные хомуты-пакеты, расположенные **V**-образно в узлах сопряжения в продольном и **V**-образно в поперечном направлениях. Таким образом, используемые хомуты имели пространственную ориентацию.

Фрагменты первой серии разрушились в узлах сопряжения балок в результате отрыва растянутой опорной зоны узла, армированной преднапряженной перекрестной арматурой. Одновременно разрушались две симметрично расположенные наклонные растянутые полосы бетона стенок продольных балок. Растянутые (в продольном направлении) и сжатые (в поперечном) полосы бетона, армированные сетчатым каркасом, опирались на податливую опору в виде **T**-образного пересечения растянутых арматурных поясов продольных и поперечных балок. В последний момент произошел срез узлов сопряжения балок по высоте сечения в зоне их сопряжения. Схема

разрушения и характер образования трещин в бетоне продольных балок показаны на рисунке 1,г.

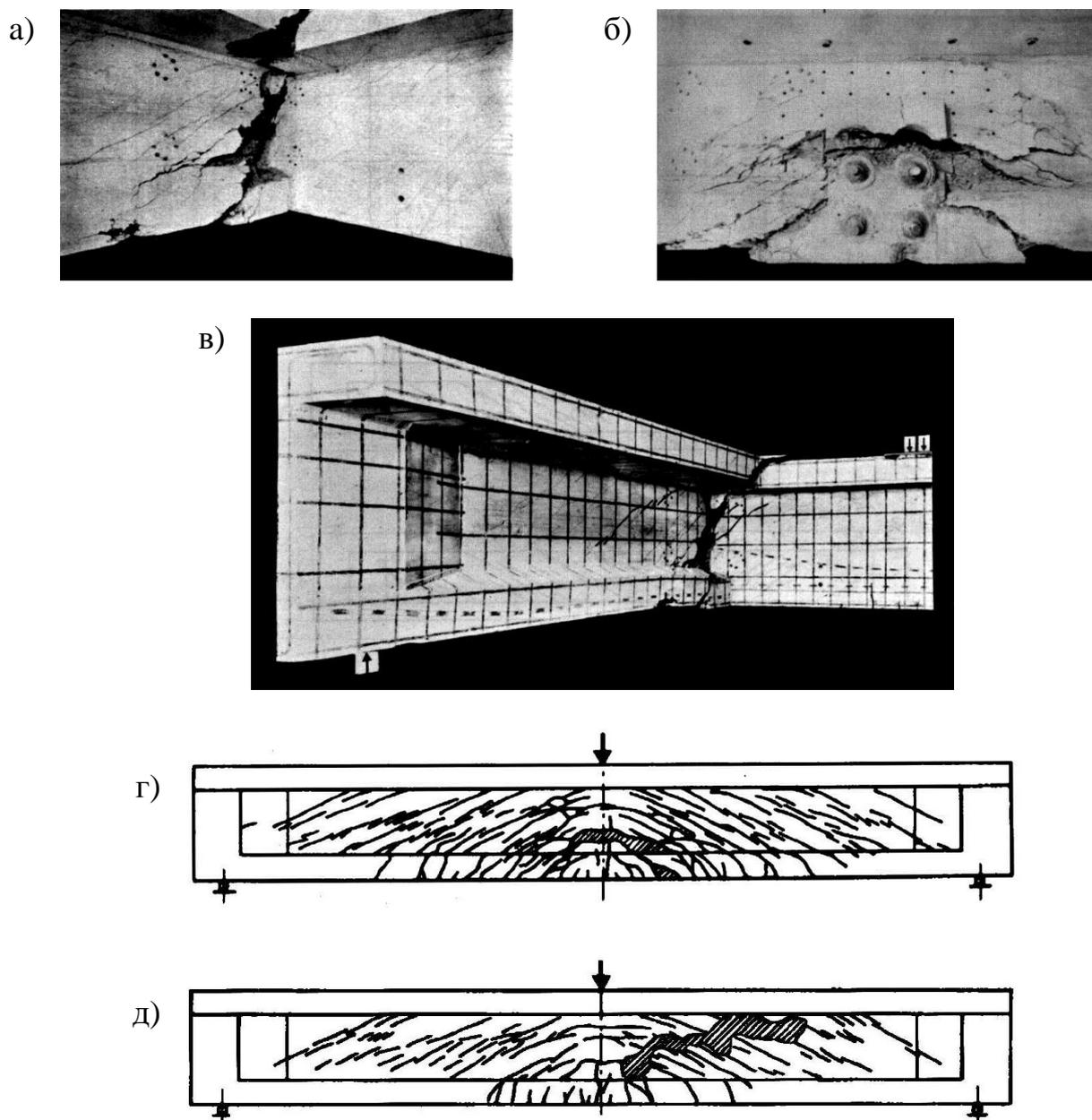


Рисунок 1 – Схемы разрушения и развития трещин в узлах монолитного сопряжения продольных и поперечной балок:

а, б – фрагменты разрушения узла сопряжения; в – общий вид разрушения; г – схема развития трещин и разрушения продольной балки, армированной сетчатым каркасом; д – то же, с армированием узла сопряжения **V**-образными пространственными хомутами

Фрагменты второй серии разрушились в результате раздавливания бетона стенки продольных балок в зоне узла сопряжения с поперечной балкой (рисунок 1,д). Разрушающая сила в этом случае оказалась в 1,5 раза выше разрушающей силы **H**-образных фрагментов балок без сосредоточенных вертикальных и наклонных хомутов.

Анализ результатов численного эксперимента показал, что сложный характер сопротивления узлов сопряжения балок и самих балок характеризуется концентрацией траекторий главных сжимающих и растягивающих напряжений в стенках балок в узлах и около узловых зонах, а также над физическими опорами продольных и поперечных балок. Нормальные напряжения концентрируются в полках сечений балок поверху и в арматурных поясах понизу. При этом, полки сечений балок и продольные стержни арматуры рассосредотачивают нормальные напряжения по вертикальной оси, образуя условные грузовые и опорные площадки значительно больших размеров в зонах передачи нагрузок, чем физические площадки. Основную роль в узлах сопряжения балок при передаче нагрузки от поперечной балки на продольные играют главные напряжения, траектории которых концентрируются над **T**-образной опорой пересечения арматурных поясов балок в узлах сопряжения.

Для оценки прочности узлов сопряжения и самих железобетонных балок построена пространственная стержневая модель (ПСМ), показанная на рисунке 2. Каждый наклонный, вертикальный или горизонтальный элемент модели имитирует условные бетонные и арматурные полосы, в пределах которых концентрируются главные либо нормальные напряжения. Модель сложного сопротивления **H**-образно расположенных балок можно представить в виде системы ромбообразных модульных элементов, образующих ферменную аналогию. Цель введения ромбообразных стержней заключается в том, что при определении продольных сжимающих или растягивающих усилий в каждом элементе модели ПСМ появляется возможность одновременного определения поперечных усилий. В сжатых элементах определяются поперечные

растягивающие усилия, образующиеся в результате развития поперечных деформаций удлинения, в растянутых элементах – поперечные усилия сжатия, образующиеся в результате поперечных деформаций укорочения. Эти усилия в расчетных сечениях балок, в том числе в зоне их совместного действия, позволяют получить картину напряженного состояния бетона и использовать известные критерии прочности для определения величин предельных усилий в бетоне и арматуре. Для этого продольные усилия  $S_i$  и  $T_i$  представляются  $\Lambda$ -образными стрижнями, рисунок 2.

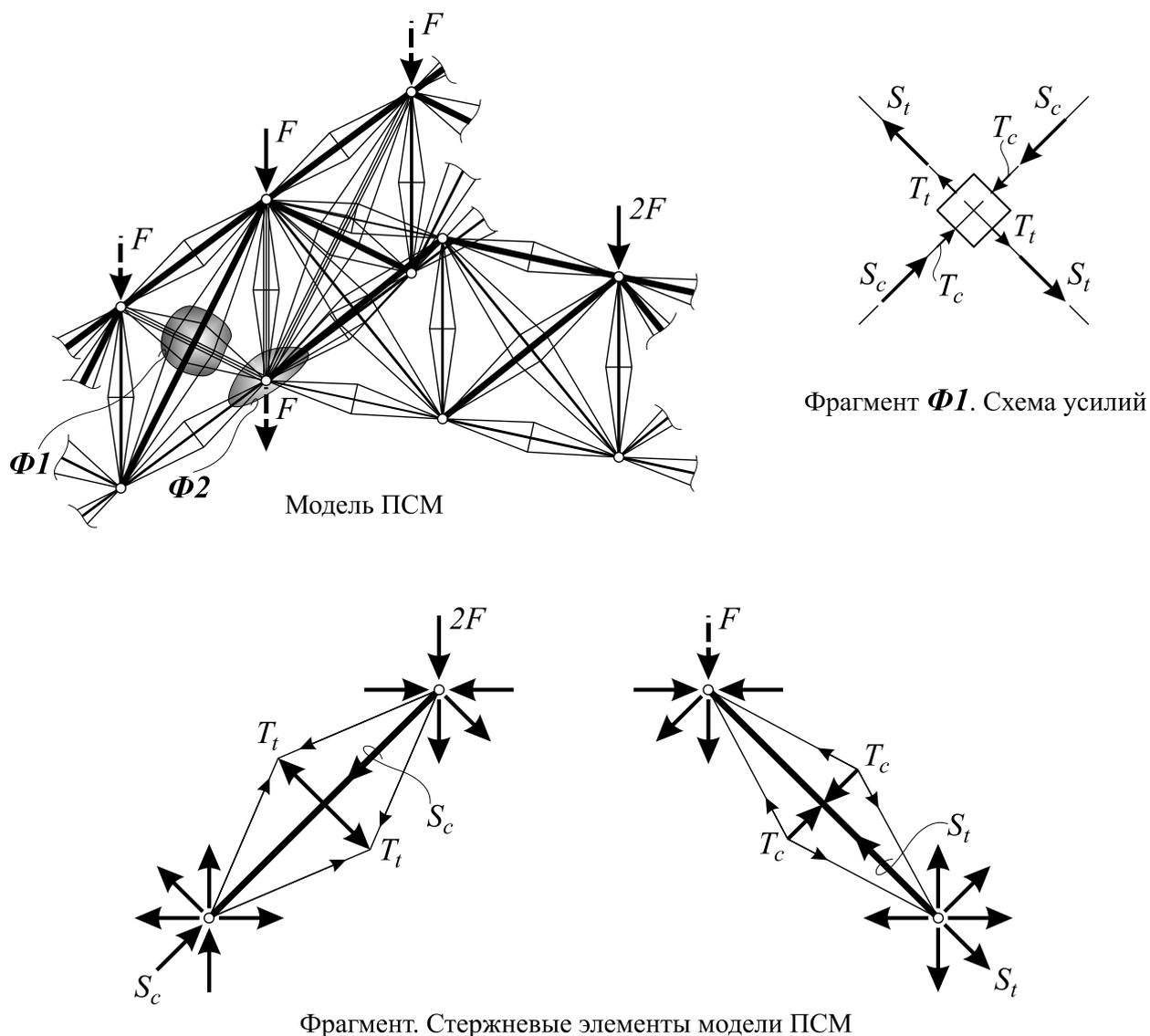


Рисунок 2 – Пространственная стержневая модель монолитного узла сопряжения продольных и поперечных усилий:

$S_{c,i}; S_{t,i}$  – усилия в наклонных элементах модели;

$T_{c,i}; T_{t,i}$  – поперечные усилия в ромбовидных элементах модели

Методология построения пространственной расчетной модели включает в себя ряд гипотез. К ним относится гипотеза образования внутренних условных опорных и грузовых площадок в узлах сопряжения продольной и поперечной арматуры. Эти площадки изменяют направление и концентрируют траектории главных напряжений. Назовем еще гипотезу трансформирования эпюр распределения главных напряжений. После определения усилий в расчетных элементах модели ПСМ производится построение расчетной пространственной каркасно-стержневой модели (ПКСМ). Фрагмент модели ПКСМ показан на рисунке 3. Каркасно-стержневая модель представляет собой железобетонный каркас балок, образуемый полосами бетона и арматурой, расположенной в сечениях полос. По очертанию модель ПКСМ напоминает железобетонные фермы-балки сквозного сечения. Ее основой является стержневая пространственная модель. В результате образуется целая система расчетных сечений железобетонных полос, в пределах которых концентрируются максимальные напряжения.

На основе каркасно-стержневой модели разработана методика расчета прочности и деформативности узлов пересечения продольных и поперечных балок и системы балок в целом. Выявлено, что прочность узлов сопряжения балок определяется прочностью армированных наклонных и вертикальных растянутых и сжатых полос бетона, имеющих пространственный характер расположения и общий опорный узел в виде Т-образного пересечения арматурных поясов балок. Прочность узла определяется сопротивлением отрыву указанной Т-образной опоры узла. Сечение отрыва определяется суммой плавно переходящих друг в друга горизонтальных, наклонных и вертикальных сечений растянутых армобетонных полос каркасно-стержневой модели ПКСМ. Это означает, что прочность каждой из перечисленных расчетных полос определяется по их расчетным сечениям, которые расположены в нижней части, в зоне узла сопряжения балок.

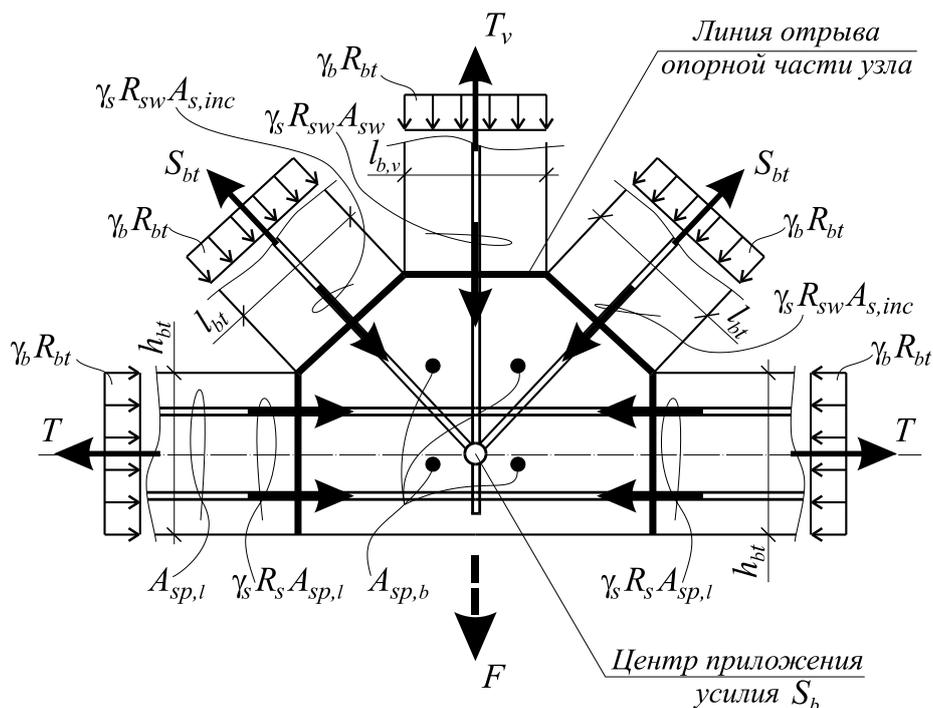


Рисунок 3 – Фрагмент каркасно-стержневой модели (КСМ)

узла сопряжения балок:

$S_{bt}$ ;  $T_v$ ;  $T$  – растягивающие продольные усилия в армобетонных поясах;

$l_{bt}$ ;  $l_{b,v}$ ;  $h_{bt}$  – расчетная ширина соответствующих полос;

$\gamma_{bt} R_{bt}$  – расчетное сопротивление в бетоне полос;

$\gamma_s R_s$  – расчетное сопротивление в соответствующей арматуре расчетных полос;

$S_b$  – сжимающее усилие в наклонном опорном стержне

Методика определения схемы и величины предельных усилий в каждой полосе модели ПКСМ основывается на теории прочности бетона и железобетона. Она учитывает количественную оценку напряжений, действующих в поперечном направлении расчетных полос модели. Практика показала, что такой метод расчета обеспечивает безопасность, хорошо согласуется с опытными данными, позволяет эффективно использовать и оценить работу арматуры. Этот метод более точно описывает характер сопротивления системы продольных и поперечных балок с монолитными узлами сопряжения. Сама пространственная каркасно-стержневая модель (ПКСМ), по сути, представляет собой принципиальную схему эффективного армирования балок и монолитных узлов их сопряжения.

### **Библиографический список:**

1. Баранова Т.И., Артюшин Д.В., Агуреев А.И. Совершенствование метода расчета монолитных узлов сопряжения железобетонных балок на основе аналоговых расчетных стержневых моделей // Academia. Архитектура и строительство. 2007. № 1. С. 74-78.
2. Баранова Т.И., Новиков В.А., Артюшин Д.В. Развитие экспериментальной базы аналоговых моделей узлов сопряжения колонн и балок монолитных каркасов // Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. 2005. № 9. С. 67.
3. Артюшин Д.В., Баркаров П.В. Оценка напряженно-деформированного состояния монолитных карнизных узлов железобетонных П-образных рам // Вестник магистратуры. 2015. № 3 (42). С. 26-28.
4. Артюшин Д.В., Баркаров П.В. Расчет и конструирование монолитных карнизных узлов железобетонных П-образных рам // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 4-2 (48). С. 41-44.
5. Артюшин Д.В., Баркаров П.В. Результаты экспериментальных исследований железобетонных трехшарнирных рам // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 6-2 (50). С. 51-59.
6. Артюшин Д.В., Шумихина В.А. Экспериментально-аналитические исследования шпоночных вертикальных стыков стен многоэтажных зданий // Моделирование и механика конструкций. 2015. № 2 (2). С. 14.
7. Артюшин Д.В. Результаты экспериментальных исследований стен из каменной кладки: Д.В. Артюшин, П.В. Баркаров // XV Международная научно-техническая конференция «Эффективные строительные конструкции: теория и практика»: сб. статей МНТК. – Пенза, 2015. – С. 17-22.