

УДК 69.059.3

**Павлов В.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: newtura@mail.ru

**Хорьков Е.В.** – аспирант

E-mail: evg-ne@mail.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

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

### **Экспериментальные исследования работы усиленных кирпичных арок при горизонтальной подвижке опор**

#### **Аннотация**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований деформативности усиленных и не усиленных каменных арок на известково-песчаных растворах при нормальной работе с ведением фактора разрушения (горизонтальной подвижки опоры). В исследовании были проведены численные и физические эксперименты. Последний из которых состоял из двух этапов. Первым этапом физического эксперимента являлось испытание не усиленной арки, до получения повреждений, характерных при возникновении подвижки опоры. На втором этапе эксперимента поврежденная арка усиливалась разработанным методом, и производилось её дальнейшее испытание. Проведенное исследование позволило определить характер вертикальных перемещений арки до и после усиления.

**Ключевые слова:** распорная система, арка, свод, фактор разрушения, усиление.

Древние арочные системы, подобно другим пространственным конструкциям, способны к частичным изменениям или полной перестройке начальной рабочей схемы за счет своих скрытых резервов. Это подтверждают многочисленные примеры деформированных конструкции, утративших часть вертикальных опор, подпружных арок, связей или других элементов, являющихся принципиальными в начальной теоретической рабочей схеме [1].

Теоретические исследования каменных распорных систем, как элементов из кладочной структуры, были проведены В.Р. Бернгардтом, Н.К. Кривошеином, Н.К. Лахтиным. Также исследованиями распорных систем занимались такие ученые механики как: П.Т. Михайлов, К.С. Завриев, В.А. Гастев, Ю.В. Кротов, Н.Н. Поликарпов, В.И. Руднев, А.В. Белов, Н.К. Снитко, И.М. Рабинович.

Основными причинами разрушений и деформаций распорных систем является горизонтальная и вертикальная подвижка опор, вызванная:

- а) недостаточной начальной жесткости стен, столбов, диафрагм и других вертикальных конструкций, несущих своды, – их податливости действию распора;
- б) снижения общей начальной жесткости при расчленении единой объемной конструкции на отдельные деформационные блоки;
- в) подвижки (с просадкой) вертикальных несущих конструкций при смещении, наклоне или местном разрушении фундаментов;
- г) разрушения или перестройки конструкций смежного объема, ранее уравновешивающего распор рассматриваемого свода;
- д) разрушения или подвижки контрфорсов [1].

Согласно [1], жесткость опорного контура является основным условием существования распорных конструкций, причем в большей степени это требование относится к горизонтальной жесткости.

Экспериментальным исследованиям каменных распорных систем предшествовало численное исследование с использованием программных комплексов. Основной целью численных исследований явилось изучение напряженно-деформированного состояния конструкций перекрытий без повреждений и с фактически обнаруженными повреждениями. Это помогло установить причины и тем самым подтвердить теорию изложенную в [1] о том, что в большинстве случаев «...распорные системы, своды

зависят от состояния конструкций, удерживающих распор, т. е. от связевого каркаса, контрфорсов, смежных перекрытий и т. п.».

Анализ результатов, полученных при проведении численных исследований позволил разработать технические мероприятия по восстановлению их работоспособности. Для подтверждения результатов исследований была разработана программа проведения физического эксперимента, результаты которого приведены ниже.

**Целью** исследования является получение экспериментальных данных о деформативности и характере трещинообразования усиленной и не усиленной арок на известково-песчаных растворах с ведением фактора разрушения (горизонтальной подвижки опоры).

**В рамках исследования были поставлены следующие задачи:**

1. Исследовать деформативность арок на известково-песчаных растворах при нормальной работе с ведением фактора разрушения (горизонтальной подвижки опоры).
2. Исследовать деформативность усиленной арки на известково-песчаном растворе с продолжением горизонтальной подвижки опоры.
3. Определить характер трещинообразования арок на всех стадиях работы.
4. Определить изменение деформативности не усиленной и усиленной арки.

В лабораторных условиях были выложены каменные арки из керамического кирпича по ГОСТ 530-2012 на известково-песчаном растворе марки М4, с геометрическими характеристиками представленными на рис. 1, при этом были соблюдены требования к возведению таких конструкций, изложенные в [2]. Для имитации изменения жёсткости опорного контура (податливости опор), была выбрана их горизонтальная подвижка, которая создавалась с помощью специально разработанной установки, представляющей собой две опоры соединенные между собой резьбовыми стержнями, одна из которых была зафиксирована, вследствие чего другая являлась подвижной от собственной массы арки (рис. 2).

Для измерения вертикальных перемещений арки были установлены индикаторы часового типа (№ 1, № 2, № 3) в трех местах (рис. 1, 2). Величина горизонтальной подвижки опоры арки измерялась также индикатором часового типа (№ 4), установленном на подвижной опоре (рис. 1, 2).

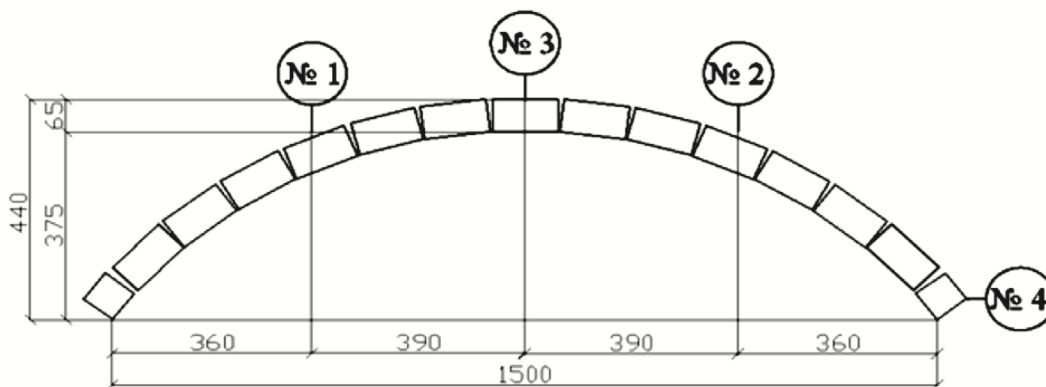


Рис. 1. Геометрические размеры арки.  
Наименования и места установки индикаторов часового типа

Эксперимент состоял из двух этапов:

Первым этапом эксперимента являлось испытание не усиленной арки, до получения повреждений, характерных при возникновении подвижки опоры. На втором этапе эксперимента поврежденная арка усиливалась разработанным методом, и производилось её дальнейшее испытание. Усиление кирпичных арок проводилось методом заключающемся в внедрении композитных материалов на основе однонаправленных углеродных волокон в кладку арки.

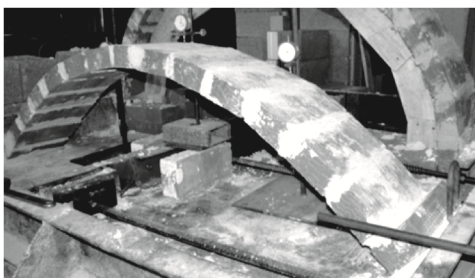


Рис. 2. Установка для испытания каменной арки на горизонтальную подвижку опоры

После каждого этапа горизонтальной подвижки пяты производился тщательный осмотр конструкции для выявления как вновь появившихся повреждений, так и степени развития уже имеющихся.

Ниже представлена табл. № 1 с величинами вертикальных перемещений не усиленных каменных арок (расположение индикаторов № 1, 2, 3 показано на рис. 1). Причём нумерация этапов исследования соответствует каждой подвижке опоры.

Таблица 1

**Результаты экспериментальных исследований не усиленной кирпичной арки на известково-песчаном растворе**

№ этапа	Горизонтальная подвижка опоры, мм	Показания индикаторов, мм		
		№ 1	№ 2	№ 3
1	0,35	0,03	0,07	0,24
2	0,7	0,25	0,17	0,5
3	1,05	0,42	0,24	0,75
4	1,4	0,94	0,35	1,08
5	1,95	1,34	0,41	1,44
6	2,5	2,04	0,83	1,93
7	3	2,42	1,05	2,48
8	4	2,82	1,31	2,63
9	5	3,22	1,45	3,08
10	6	3,77	2,19	3,33
11	7	4,32	2,39	3,53
12	8	4,71	2,64	4,03
13	9	5,02	2,94	4,58
14	10	5,37	3,19	5,58

При подвижке опоры не усиленных арок происходит образование шарнира в щельге (рис. 3), и в двух или одной точке расположенных на  $1/7$  высоты от щельги, к направлению к опоре. При этом первоначально образование и раскрытие трещины происходит на нижней поверхности свода в середине пролета, а затем распространяются по всей высоте сечения.



Рис. 3. Образование трещины в области щельги арки при горизонтальной подвижке опоры до 10 мм

На втором этапе эксперимента производилось усиление поврежденных арок (полученных при испытании на первом этапе) разработанным нами методом внедрения композитных материалов в кладку арки.

Усиление производилось 2-мя лентами из тканого холста на основе однонаправленных углеродных волокон шириной 1,5 см в один слой. Наклеивались ленты на двухкомпонентный эпоксидный клей (рис. 4, 5). Ниже представлена таблица № 2 с величинами вертикальных перемещений усиленных каменных арок (расположение индикаторов № 1, 2, 3, 4 показано на рис. 1). Причём нумерация этапов проводимого эксперимента соответствует каждой подвижке опоры.



Рис. 4. Усиление верхней поверхности арок УГВ-лентами



Рис. 5. Усиление нижней поверхности арок УГВ-лентами

По результатам испытаний можно сделать предположение об изменении деформативности и характера разрушения распорной системы. Основанием для этого может послужить остановка развития раскрытых трещин и изменение вертикальных перемещений. Закрывание шарниров влечет за собой неизбежную трансформацию системы в новую.

По результатам испытаний была построена сравнительная диаграмма зависимости между величиной горизонтальной подвижки и вертикальными перемещениями в трех точках (рис. 6).

Сравнивая результаты диаграммы усиленных и не усиленных арок, можно сделать следующие выводы.

Характер вертикальных перемещений арки до усиления и после был изменен, как видно из диаграммы при подвижке до 10 мм, перемещения левой части арки и область шельги были 1,7 раза выше чем правая часть, после усиления при подвижке от 20 мм до 28 мм перемещения сравнялись, что говорит об изменении расчетной схемы арки.

В результате проведенного исследования определено, что предложенный метод усиления каменных арок позволяет значительно увеличить несущую способность.

Таблица 2

**Результаты экспериментальных исследований усиленной кирпичной арки на известково-песчаном растворе**

№ этапа	Горизонтальная подвижка опоры, мм	Показания индикаторов, мм		
		№ 1	№ 2	№ 3
1	10	5,37	3,19	5,58
2	10,3	5,57	3,29	5,78
3	10,6	5,76	3,31	6,01
4	11	6,03	3,38	6,26
5	11,5	6,27	3,74	6,5
6	12	6,34	4,03	6,69
7	12,5	6,53	4,44	6,98
8	13	6,67	4,73	7,21
9	13,5	6,83	5,05	7,48
10	14	7,00	5,39	7,71
11	15	7,42	6,19	8,29
12	16	7,87	6,99	8,78
13	17	8,21	7,64	9,3

Продолжение таблицы 2

14	18	8,57	8,31	9,8
15	19	8,97	9,14	10,46
16	20	9,28	9,77	10,93
17	21	9,75	10,77	11,61
18	22	10,08	11,44	12,16
19	23	10,42	12,04	12,73
20	24	10,72	12,75	13,19
21	25	11,12	13,51	13,71
22	26	11,5	14,31	14,27
23	27	11,81	14,95	14,66
24	28	12,25	15,75	15,22
25	29	12,78	16,75	15,82
26	31	13,6	18,41	16,94
27	33	14,4	19,97	17,85
28	35	15,26	20,64	18,79
29	37	15,97	21,31	19,73
30	39	16,82	22,81	20,73
31	41	17,61	24,71	21,73
32	43	18,34	26,11	22,53
33	45	19,47	28,35	23,98
34	47	20,26	29,93	24,91
35	49	21,36	32,03	26,06
36	51	22,21	33,87	27,19
37	53	23,01	35,53	28,09
38	55	23,88	37,35	29,28

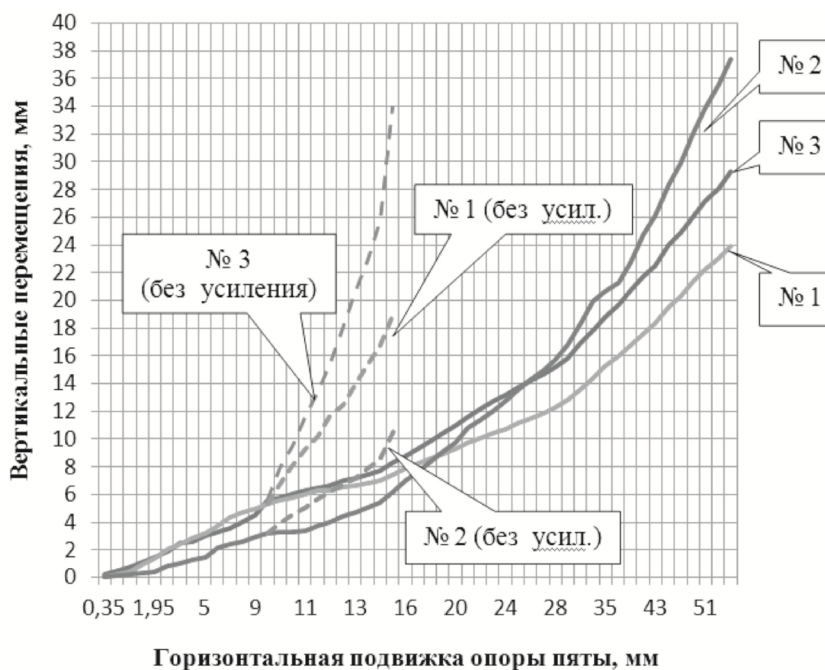


Рис. 6. Диаграмма вертикальных перемещений усиленной и не усиленной арки при горизонтальной подвижке опоры. Обозначение и расстановка индикаторов на рис. 1

### Список библиографических ссылок

1. Бессонов Г.Б. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. – М.: Союзреставрация, 1989. – 171 с.

2. АХЦ «АРХХРАМ» Православные храмы. Том 2. Православные храмы и комплексы. Пособие по проектированию и строительству (к СП 31-103-99) МДС 31-9.2003, 2003.
3. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 104 с.
4. Бернгард В.Р. Арки и своды. Руководство к устройству и расчету арочных и сводчатых перекрытий. – СПб.: Типография Ю.Н. Эрлих, 1901. – 128 с.
5. Кривошеин Н.К. Расчет упругих сводов. Расчет упругих сводов по методу предельного равновесия. – Петроград: Типография Бенке, 1918. – 42 с.
6. Пашкин Е.М., Бессонов Г.Б. Диагностика деформации памятников архитектуры. – М.: Стройиздат, 1984. – 151 с.
7. Физдель И.А. Дефекты и методы их устранения в конструкциях и сооружениях. – М.: Стройиздат, 1970. – 175 с.
8. Лахтин Н.К. Расчет арок и сводов. Руководство к аналитическому и графическому расчету арочных и сводчатых перекрытий. – М.: Студенческое Издательское Общество при Императорском Техническом Училище, 1911. – 468 с.
9. Красовский А.К. Гражданская архитектура. Части зданий. Сочинение Аполлинария Красовского. – СПб.: Типография А.А. Левенсон, Петровка, Рахмановский переулок, собственный дом, 1851. – 586 с.

**Pavlov V.V.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: newtura@mail.ru

**Khorkov E.V.** – post-graduate student

E-mail: evg-ne@mail.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

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

### **Experimental research of strengthening brick arches functioning according to horizontal slip of pillar**

#### **Resume**

The research objective is receiving experimental data about the deformation and character of cracking in masonry arches, strengthened and unstrengthened. In moving the end support it reveals the weak points that cause arch failure. This experiment consists of two stages. The first stage of the experiment is the testing of an unstrengthened arch. This is checked by the removal of the end joint support. It is at this point dead load (of the arch) creates the emergence of cracking which reveals how damages occurs in the arch itself. The second stage of the experiment is done through the strengthening of the arch (done with own method) with a composite carbon based material that is integrated into the masonry arch. The strengthening of the masonry arches are carried out using a method of a composite carbon based plate that is integrated into the arch itself based on compression/tension points of the arch. By the results of the test it is possible to understand where the cracking occurs that weakens the masonry system. By introducing the corrective method the behavior of the new system rectifies this. The introduction the composite carbon plates and development processes are what is used for implementing the correction.

**Keywords:** an arch, the destruction factor, a support motion, strengthening.

#### **Reference list**

1. Bessonov G.B. Research of deformations, calculation of bearing ability and constructive strengthening of ancient systems. – М.: Unionrestoration, 1989. – 171 p.
2. АСЦ «АРХХРАМ» Православные храмы. Том 2. Православные храмы и комплексы. Пособие по проектированию и строительству (к СП 31-103-99) МДС 31-9.2003, 2003.

3. Sokolov B.S., Antakov A.B. Research masonry and reinforced masonry structures. – M.: Publishing ACB, 2010. – 104 p.
4. Berngard V.R. Archs and Vaults. Guide to the device and calculating arched and vaulted ceilings. – SPb.: Typography U.N. Erlich, 1901. – 128 p.
5. Krivoshein N.K. Calculation of elastic arches. Calculation of elastic arches on the limit equilibrium method. – Petrograd : Typography Behnke, 1918. – 42 p.
6. Pashkin E.M., Bessonov G.B. Diagnosis deformation monuments. – M.: Stroyizdat, 1984. – 151 p.
7. Fizdel I.A. Defects and methods in designs and constructions. – M.: Stroyizdat, 1970. – 175 p.
8. Lahtin N.K. Calculation of arches and vaults. Guide to the analytical and graphical calculation arched and vaulted ceilings. – M.: Publishing Student Society at the Imperial Technical School, 1911. – 468 p.
9. Krasovsky A.K. Civil architecture. Parts of buildings. – SPb.: Typography A.A. Levenson, 1851. – 586 p.