

УДК 624.072.32

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ДВУХШАРНИРНЫХ АРОК ИЗ БЕТОНА  
РАЗНЫХ СОСТАВОВ**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ДВОХШАРНІРНИХ АРОК З БЕТОНУ РІЗНИХ  
СКЛАДІВ**

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF WORK OF  
REINFORCED CONCRETE DOUBLE-JOINT ARCHES OF DIFFERENT  
CONCRETES**

**Пушкар Н.В., к.т.н., доц., Григораши О.Ю., аспирант, Хассейн Джухад  
Салман Аль-Амери, аспирант (Одеська державна академія будівництва та  
архітектури, м. Одеса)**

**Пушкарь Н.В., к.т.н., доц., Григораши А.Ю., аспирант, Хассейн Джухад  
Салман Аль-Амери, аспирант (Одесская государственная академия  
строительства и архитектуры, г. Одесса)**

**Pushkar N.V., candidate of technical sciences, lecturer, Grigorash A.Y, Ph. D.  
student, Hasein Juhad Salman Al-Amery, Ph. D. student (Odessa State  
Academy of Building and Architecture, Odessa)**

**Наведений опис утворення та розвитку тріщин в трьох моделях  
двошарнірних арок, виготовлених з різних складів бетону, при  
завантаженні двома зосередженими силами. Виконані розрахунки  
моделей арок у ПК «SCAD»: пружний і за деформованою схемою з  
урахуванням тріщиноутворення при збільшенні навантаження.**

**Приведено описання образования и развития трещин в трёх моделях  
двухшарнирных арок, изготовленных из разных составов бетона, при  
загрузении двумя сосредоточенными силами. Выполнены расчёты  
моделей арок в ПК «SCAD»: упругий и по деформируемой схеме с учётом  
образования и развития трещин при увеличении нагрузки.**

**Given a description of formation and development cracks in three models  
of two-hinged arches, made of different concrete, with a loaded two  
concentrated forces. Made the calculations of arches models in the PC  
«SCAD»: elastic and deformable scheme with accounting of formation and  
development of cracks, when the load increases.**

**Ключевые слова:**

Арка, бетон, тріщини, розрахунок.

Arka, beton, трещины, расчёт.

Arch, concrete, cracks, calculation.

**Введение.** Арки – одни из самых эффективных плоскостных конструкций, так как их форма способствует восприятию нагрузок. Проведенный анализ литературных источников показал, что поведение железобетонных арок при нагружении исследовано недостаточно, особенно мало изучены двухшарнирные арки, у которых на опорах исключено влияние изгибающего момента.

Особым фактором, влияющим на поведение арки под действием нагрузки, общепризнанно является её форма (выпуклость в сторону нагрузки), которая относит арки к малоизученным конструкциям. Увеличение подъёмности арки увеличивает и её несущую способность, но вместе с тем и существенно изменяет картину напряженно-деформированного состояния, поэтому в данной работе был исключен этот самый осложняющий фактор.

Появление современных материалов, улучшающих структуру бетона в процессе твердения, позволяет повысить эксплуатационные качества конструкции. В оценке эксплуатационных характеристик железобетонных конструкций наряду с механическими показателями, чрезвычайно важное значение имеет их долговечность, которая при известных условиях эксплуатации и свойствах бетона, не является абсолютной величиной, остающейся неизменной в течение времени [1].

**Постановка цели и задач исследований.** Длительная эксплуатация железобетонных конструкций показывает, что деструктивные процессы в бетоне могут возникать при отсутствии каких либо агрессивных факторов во внешней среде и вызываться процессами, возникающими внутри тела бетона, при взаимодействии щелочей цемента с аморфным кремнезёмом, содержащимся в заполнителе.

С целью улучшения свойств бетона выполнены экспериментальные исследования моделей двухшарнирных арок, изготовленных из обычного тяжёлого бетона (АА-1), бетона с химической добавкой «Пенетрон Адмикс», способствующей «самозалечиванию» микротрещин (АВ-1), и бетона с добавлением полипропиленового волокна, также благоприятно влияющего на характеристики бетона в начальный период твердения (АВ-1) [2...8].

Размеры моделей арок были подобраны в соответствии с пропорциями, рекомендуемыми в литературе, и составили: поперечное сечение –  $b \times h = 5 \times 7$  см, пролёт –  $L = 210$  см, стрела подъёма –  $f = 42$  см. Все арки армировались одним плоским вязаным каркасом из двух стержней  $\varnothing 4$  мм класса Вр-1, поперечные стержни также  $\varnothing 4$  мм класса Вр-1, установленные с шагом 150 мм. Состав бетона приведен в [9].

**Методика исследований.** Экспериментальные арки испытывались как шарнирно опертые, нагруженные двумя сосредоточенными силами, расположенными на расстояниях  $L/3$  от опор, в вертикальном положении на специально разработанном стенде [10]. Загрузка проводилась ступенями по 2 кН до разрушения, прогибы арок при испытании измерялись с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм, показания которых снимались дважды – в начале и в конце каждой ступени нагружения. При выдержке под нагрузкой на каждой ступени проводился визуальный осмотр поверхностей арок, фиксировался процесс образования и развития трещин.

**Результаты исследований.** Арка из тяжелого бетона **АА-1**. Первые нормальные трещины в арке появились при нагрузке  $F=10\text{кН}$  (5-я ступень нагружения) в нижней растянутой зоне бетона под приложенными сосредоточенными силами, длиной около 30 мм каждая. При этой же нагрузке появилась трещина в верхней растянутой зоне арки на расстоянии  $1/8L$  от левой опоры длиной ~35 мм. По мере возрастания нагрузки до  $F=22\text{кН}$  (11-я ст.) их длина увеличилась по вертикали ~до 60 мм, затем их рост прекратился. При нагрузке  $F=18\text{кН}$  (9-я ст.) образовались по 2 трещины в верхней зоне правой и левой частей арки на расстояниях  $\sim 1/10L$  от опор на расстоянии 10 мм друг от друга. В этот же момент, правее первой трещины под левой силой на 70 мм появилась новая, практически параллельная первой, трещина длиной 30 мм, которая до нагрузки  $F=26\text{кН}$  (13-я ст.) подросла по вертикали до 47 мм. По мере возрастания нагрузки трещины в верхней зоне увеличились по длине, достигая середины сечения арки, на 10-й и 11-й ступенях рядом с ними на расстоянии ~80 мм появилось ещё по одной трещине, которые до нагрузки  $F=26\text{кН}$  (13-я ст.) достигли середины сечения арки.

Арка из тяжелого бетона, модифицированного добавкой «Пенетрон Адмикс» **АБ-1**. Первые четыре нормальные трещины появились в нижней растянутой зоне бетона сразу при подаче нагрузки  $F=2\text{кН}$  (1-я ст.): посередине арки, под силами и одна – правее левой силы на 100 мм, их длина составила от 33 до 63 мм. На начальных этапах нагружения трещины между силами больше не развивались и даже закрылись при дальнейшем увеличении нагрузки, трещины под силами при нагрузках  $F=20\text{кН} \dots F=26\text{кН}$  (10-я...13-я ст.) увеличились по длине до 53 мм. При нагрузке  $F=8\text{кН}$  (4-я ст.) появилось ещё по одной трещине в нижней растянутой зоне арки под силами на расстояниях  $\sim 100$  мм от ранее образовавшихся. Их первоначальная длина 30 мм при росте нагрузки до  $F=28\text{кН}$  (14-я ст.) увеличилась до 63 мм. При нагрузке  $F=16\text{кН}$  (8-я ст.) образовались три трещины в верхней зоне правой части арки на расстоянии  $\sim 1/9L \dots 1/20L$  от правой опоры на расстояниях 100 и 50 мм друг от друга. Их длина сразу достигла середины сечения, а при росте нагрузки до  $F=26\text{кН}$  (13-я ст.) – в среднем, длины 50 мм. При нагрузках

$F=20\text{кН}...F=28\text{кН}$  (10-я...14-я ст.) в правой приопорной части арки появились ещё две трещины на расстояниях  $\sim 60$  мм от образовавшихся ранее длиной, в среднем, до 30 мм. При нагрузках  $F=24\text{кН}...F=28\text{кН}$  (12-я...14-я ст.) в левой приопорной части арки появились три трещины в верхней растянутой зоне на расстоянии  $\sim 1/7L...1/14L$  от левой опоры с окончательной длиной до 35 мм.

Арка из тяжелого бетона с добавлением полипропиленового волокна **AB-1**. Первые трещины начали появляться при нагрузке  $F=2\text{кН}$  (1-я ст.), две зеркальные относительно оси симметрии арки трещины на расстояниях 100 мм от точек приложения сил в нижней зоне длиной, в среднем, по 35 мм, на этом же этапе их развитие закончилось. При нагрузке  $F=4\text{кН}$  (2-я ст.) появилась новая вертикальная трещина справа от оси симметрии арки длиной 27 мм, которая также сразу прекратила рост. При нагрузке  $F=6\text{кН}$  (3-я ст.) образовалась следующая трещина в нижней зоне под правой сосредоточенной силой, которая развилась до нагрузки  $F=12\text{кН}$  (6-я ст.), достигая длины 60 мм, после чего прекратила рост. При этой же нагрузке появилась новая трещина в нижней зоне под левой сосредоточенной силой, направленная к точке приложения силы. При нагрузке  $F=24\text{кН}$  (12-я ст.) её рост прекратился, длина составила 50 мм. При нагрузке  $F=16\text{кН}$  (8-я ст.) в нижней зоне, слева от правой силы образовалась новая трещина длиной 30 мм, которая развилась до нагрузки  $F=28\text{кН}$  (14-я ст.), достигая длины 50 мм. При этой же нагрузке на расстоянии  $\sim 1/9L$  от левой опоры в верхней зоне образовалась трещина длиной 20 мм, которая развивалась до нагрузки  $F=22\text{кН}$  (11-я ст.), достигая длины 40 мм. При нагрузках  $F=18\text{кН}...F=28\text{кН}$  (9-я...14-я ст.) наблюдалось появление и рост в верхней зоне приопорных частей арки нескольких нормальных, параллельных между собой трещин, на расстоянии  $\sim 1/17...1/6L$  слева от правой опоры и  $\sim 1/10L...1/6L$  справа от левой опоры, расстояние между этими трещинами составило  $\sim 50...100$  мм (рис.1).

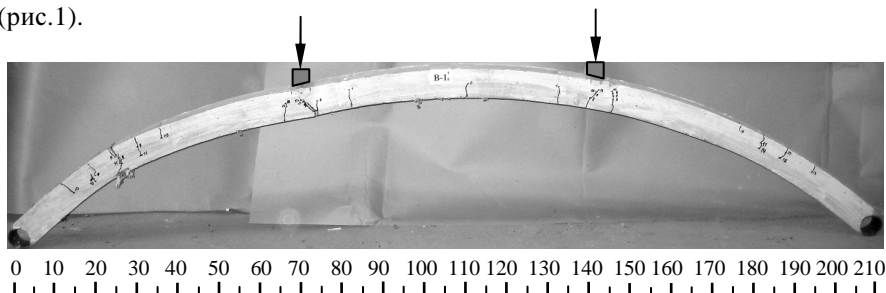


Рис.1. Характер развития трещин в арке AB-1

Как следует из экспериментальных данных, в процессе увеличения нагрузки железобетонные арки накапливают количество трещин,

распределение которых по длине неравномерное. К тому же, под действием нагрузки участки железобетонной арки могут испытывать различное напряженно-деформированное состояние, что можно описать разными моделями поведения материала в конструкции (упругой, упругопластической) [11...14].

С.А.Вернштейн отмечает, что задача расчёта арки не может считаться разрешенной полностью, если не учитывается изменение формы оси арки под нагрузкой [13]. Даже незначительные упругие перемещения оси создают заметное отклонение от кривой давления, вызывая появление дополнительных изгибающих моментов. Трудности этой задачи чрезвычайно велики, так как она нелинейная и требует учёта изменения расчётной схемы под нагрузкой.

Так как и в настоящее время процесс построения математических моделей, учитывающих геометрическую и физическую нелинейности при расчете конструкций, выделяется в отдельную задачу, то в данной работе применён экспериментально-теоретический подход, позволяющий использовать возможности программного комплекса «SCAD» для получения напряженно-деформированного состояния конструкции по внешним признакам [15]. В качестве исходных данных для расчетной модели арки с использованием численного метода конечных элементов использовались: картина трещин по поверхности арки; интенсивность внешней нагрузки; срединная поверхность арки с приобретёнными в процессе нагружения вертикальными перемещениями (прогибами).

В результате числового исследования выполнен расчёт трёх экспериментальных арок (АА-1, АБ-1, АВ-1), где в качестве исходных данных использовались не только геометрические параметры моделей арок и механические характеристики материала, но и изменённые жёсткости арок по длине, а также приобретённые прогибы в процессе нагружения. Модели арки были разбиты на 100 стержневых конечных элементов (КЭ). Для сравнения результатов выбраны конечные элементы №11 и №89, расположенные на одинаковом расстоянии от левой и правой опор, а также средний конечный элемент №50. Были выполнены расчёты упругой арки, а также трёх моделей (АА-1, АБ-1, АВ-1). В таблице 1 приведены результаты упругого расчета для 5-й, 9-й, 12-й и 14-й ступеней нагружения. Диапазон изменения эксцентриситета при упругом расчёте составил от 0,68 см до 2,37 см (продольная сила  $N$  действует в пределах сечения арок).

Расчёт, выполненный с учётом деформируемой схемы моделей тех же арок, а также трещинообразования, уменьшающего жёсткость конструкций, приведен в таблице 2. Диапазон изменения эксцентриситета составил: для арки из тяжёлого бетона – от 0,48 см до 3,00 см; для арки из бетона, модифицированного добавкой «Пенетрон Адмикс» – от 0,20 см до 3,57 см (продольная сила  $N$  действует за пределами сечения арки); для

арки из бетона с добавлением полипропиленового волокна – от 0,14 см до 3,39 см.

Таблица 1

Результаты упругого расчёта арок

№ КЭ	Степень загрузки	Изгибающий момент М, кНм	Продольная сила N, кН	Эксцентриситет e, см
11	5	-0,418	-24,61	1,70
11	9	-0,674	-32,27	2,09
11	12	-0,867	-38,02	2,28
11	14	-0,992	-41,86	2,37
50	5	0,143	-21,14	-0,68
50	9	0,168	-27,69	-0,67
50	12	0,186	-32,60	-0,57
50	14	0,199	-35,87	-0,55
89	5	-0,418	-24,99	1,70
89	9	-0,674	-32,66	2,09
89	12	-0,867	-38,41	2,28
89	14	-0,992	-42,25	2,37

Таблица 2

Результаты неупругого расчёта арок

№ КЭ	Степень загрузки	Эксцентриситет e, см			
		Упругий расчет	Физическая нелинейность + деформируемая схема		
			Арка АА-1	Арка АБ-1	Арка АВ-1
11	5	1,70	1,85	1,92	1,84
11	9	2,09	2,43	2,44	2,36
11	12	2,28	2,75	2,79	2,75
11	14	2,37	2,94	3,16	2,96
50	5	-0,67	-0,48	0,20	-0,14
50	9	-0,61	0,03	0,60	0,33
50	12	-0,58	0,32	0,95	0,70
50	14	-0,56	0,28	1,46	0,81
89	5	1,70	1,82	1,96	1,93
89	9	2,09	2,47	2,68	2,64
89	12	2,28	2,85	3,17	3,13
89	14	2,37	3,00	3,57	3,39

**Выводы.** Выполненный в программном комплексе «SCAD» упругий расчёт испытанных моделей железобетонных двухшарнирных арок, изготовленных из разных составов бетона, не соответствует реальной картине напряжённо-деформированного состояния моделей арок при

загружении. Уточняющие расчёты с учётом деформируемой схемы и образования трещин, показывающие реальную картину напряжённо-деформированного состояния (табл.2), отличаются от упругого расчёта до 34%, т.е. упругий расчёт занижает моментную составляющую, поэтому для реального проектирования следует вести расчёт арок с учётом физической и геометрической нелинейностей.

1. Штарк И., Вихт Б. Долговечность бетона. – К.: Оранта, 2004. – 301 с.
2. ТУ У 24.7-32781078-001:2006. Волокно армирующее полипропиленовое ВАП (фибра). Днепропетровск, 2004. – 31 с.
3. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1987. – 148 с.
4. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. – М.: АСВ, 2004. – 560 с.
5. Волков И.В. Фибробетон состояние и перспективы применения в строительных конструкциях // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2004. – №5. – С.24-25.
6. Бабков В.В., Дистанов Р.Ш., Недосеко И.В., Ивлев В.А., Шакиров Д.А., Струговец И.Б. Фибробетон в производстве железобетонных изделий дорожного и коммунального назначения (Часть 2 – Автодорожные засыпные арочные мосты на основе сталефибробетона) // Инженерные системы в строительстве и коммунальном хозяйстве, 2010. – №4 (38). – С. 12-16.
7. Дистанов Р.Ш. Малопролетные арочные конструкции на основе сталефибробетона: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Самара, 2009. – 19 с.
8. Научно-техническое заключение по теме: «Проведение испытаний по определению влияния добавки «Пенетрон Адмикс» на бетон по показателям: водонепроницаемость, морозостойкость, прочность». Филиал ФГУП «НИЦ СТРОИТЕЛЬСТВО» – Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона НИИЖБ. Москва, 2008. – 13 с.
9. Пушкарь Н.В., Хассеин Джухад Салман Аль-Амери, Сабир Юсиф Бакир. Технологическая поврежденность бетона, армированного полипропиленовым волокном // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2013. – Вип.25. – С.127-132.
10. Дорофеев В.С., Мацей Р.А., Пушкарь Н.В., Коломийчук Г.П. Стенд для испытания железобетонных двухшарнирных арок // Вісник ОДАБА. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2013. – Вип. 50, частина 1. – С. 94-104.
11. Мунир Абид. Расчет железобетонных стержневых систем с учетом физической и геометрической нелинейности: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Санкт - Петербург, 1992. – 24 с.
12. Грицкова Т.Е. Методика расчета арок на устойчивость с учетом геометрической и физической нелинейностей // Промышленное и гражданское строительство, 1994. – №2. – С.21-22.
13. Нугуманов Д.Т. Устойчивость двухшарнирных трубобетонных арок при кратковременном нагружении: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Санкт - Петербург, 1997. – 19 с.
14. Бабич С.В. Робота та несуча здатність стиснутих залізобетонних елементів із різними ексцентриситетами на кінцях: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Полтава, 1998. – 17 с.
15. Козлов А.А., Кузина Ю.А., Буланов В.Е. Исследование внецентренно сжатых элементов в программном расчетном комплексе SCAD // Современные наукоемкие технологии, 2013. – №8. – С. 89-90.