

УДК 624.012.45

**НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ДВУХШАРНИРНЫХ АРОК ПРИ
НЕСИММЕТРИЧНОМ ЗАГРУЖЕНИИ**

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ДВОХШАРНІРНИХ АРОК ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ
ЗАВАНТАЖЕННІ**

**STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED CONCRETE DOUBLE-
JOINT ARCHES UNDER UNSYMMETRICAL LOAD**

**Пушкар Н.В., к.т.н., доц., Григораш О.Ю., аспирант, Сабір Юсіф Бакір,
аспірант (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)**

**Пушкаръ Н.В., к.т.н., доц., Григораш А.Ю., аспирант, Сабир Юсиф
Бакир, аспирант (Одесская государственная академия строительства и
архитектуры, г. Одесса)**

**Pushkar N.V., candidate of technical sciences, lecturer, Grigorash A.Y, Ph. D.
student, Sabir Yusif Bakir, Ph. D. student (Odessa State Academy of Building
and Architecture, Odessa)**

**Наведені результати експериментально-теоретичних досліджень роботи
моделей залізобетонних двохшарнірних арок при несиметричному
завантаженні. Виконані розрахунки моделей арок у ПК «SCAD»: пружний і за деформованою схемою з урахуванням утворення і розвитку тріщин при збільшенні навантаження, проведений аналіз.**

**Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований
работы моделей железобетонных двухшарнирных арок при
несимметричном нагружении. Выполнены расчёты моделей арок в ПК
«SCAD»: упругий и по деформируемой схеме с учётом образования и
развития трещин при увеличении нагрузки, проведен анализ.**

**The results of experimental and theoretical research of work of models of
reinforced concrete double-hinged arches under unsymmetrical load are
shown. 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, conducted the analysis.**

Ключевые слова:

Арка, залізобетон, навантаження, розрахунок, ексцентриситет.

Арка, железобетон, нагрузка, расчёт, эксцентриситет.

Arch, reinforced concrete, load, calculation, eccentricity.

Введение. Из теории устойчивости арок известно, что во многих случаях при действии поперечного симметричного давления критические нагрузки, соответствующие несимметричным формам потери устойчивости, оказываются меньше критических нагрузок, соответствующих симметричным формам потери устойчивости [1...3].

При увеличении нагрузки наблюдается следующая картина деформирования арки: вначале появляются симметричные прогибы, затем при некотором значении параметра нагрузки на них накладываются несимметричные прогибы. Если это значение параметра нагрузки оказывается меньше, чем верхняя критическая нагрузка, соответствующая симметричной форме потери устойчивости, а это зависит от геометрии арки, то происходит потеря устойчивости по несимметричной форме. Инициатором несимметричного деформирования может служить и нагрузка, действующая на арку [4]. В работе [5] выполнены экспериментальные исследования моделей бесшарнирных железобетонных арок под действием симметричной и несимметричной равномерно распределенной и сосредоточенной нагрузок. Полученные результаты показали неблагоприятное воздействие на арки несимметричной нагрузки, при которой несущая способность была значительно меньше.

Постановка цели и задач исследований. В процессе эксплуатации арочные конструкции подвержены воздействию различных видов силовых нагрузений. В данной работе рассматриваются двухшарнирные железобетонные пологие круговые арки одинаковой геометрии под действием симметричного (модель А-3) и несимметричного загрузений (модели А-1 и А-2) с целью выявления влияния несимметричного нагружения на их напряженно-деформированное состояние.

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 [6].

Методика исследований. Экспериментальные арки испытывались в вертикальном положении как шарнирно опертые на специально разработанном стенде [7]. Загружение осуществлялось сосредоточенной силой через распределительную траверсу, передающую нагрузку на верхнюю грань арки в двух точках. Были предусмотрены три вида загрузения: по центру траверсы и со смещением – в трети её пролёта и в четверти. Арка А-3 загрузалась по центру траверсы, А-1 – в четверти пролёта траверсы, А-2 – в трети пролёта траверсы.

Загружение моделей арок производилось ступенями по $0,1F_u$, с выдержкой на каждой ступени 5 мин. Прогибы арок 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 (рис.1,2,3).

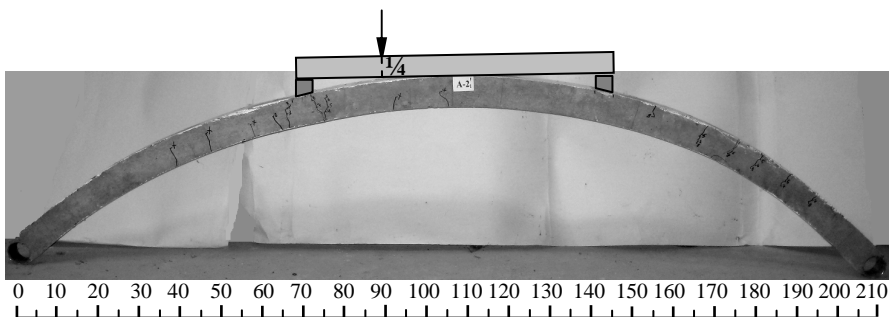


Рис.1. Характер развития трещин в арке А-1

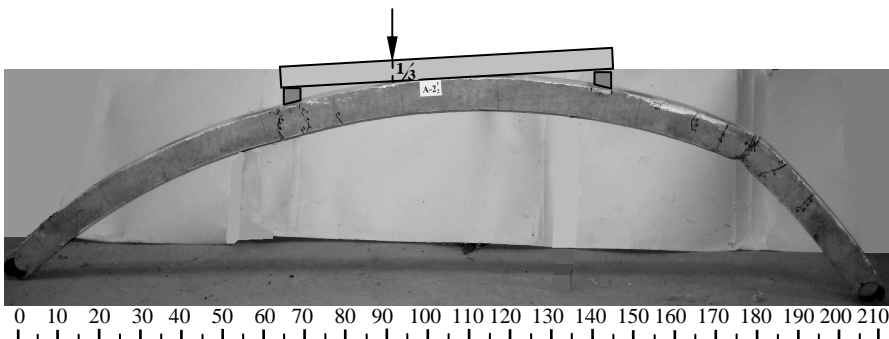


Рис.2. Характер развития трещин в арке А-2

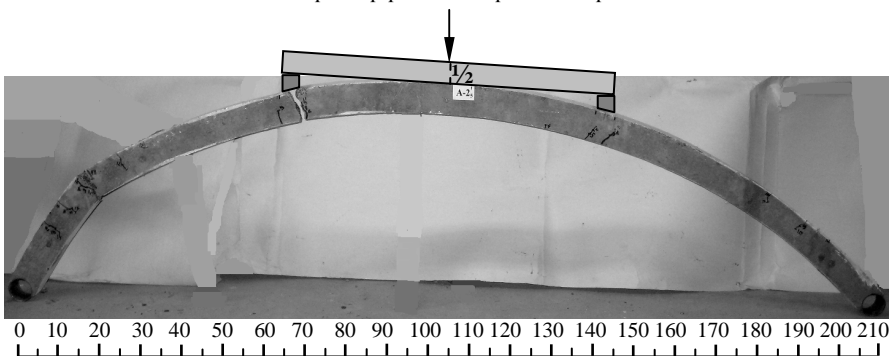


Рис.3. Характер развития трещин в арке А-3

Результаты исследований. В работе применён экспериментально-теоретический подход, позволяющий использовать возможности программного комплекса «SCAD» для получения напряженно-деформированного состояния конструкции по внешним признакам на каждом новом этапе загрузки [8]. В качестве исходных данных для расчётной 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 (А-1, А-2, А-3), 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 арок были разбиты на 100 стержневых конечных элементов (КЭ). Для сравнения результатов выбраны характерные места арок (конечные элементы) расчетной модели. Для модели арки А-3 (симметричное нагружение) выбраны на левой полуарке конечные элементы №13, №28, №33 и симметрично им на правой полуарке – №87, №72, №67, а также у оси симметрии арки – №49. Для моделей арок А-1, А-2 (несимметричное нагружение) характерные места подбирались по амплитудным и нулевым значениям изгибающих моментов.

Выполненные расчёты трёх моделей арок (А-1, А-2, А-3) проанализированы и представлены в табличной форме. В таблице 1 приведены результаты расчета модели арки А-3 для 7-й, 9-й, 12-й и 14-й ступеней нагружения. Диапазон изменения эксцентриситета при упругом расчёте (ст.14) составил от -3,07 см до 2,42 см (продольная сила N действует в пределах сечения арки), а при расчёте с учётом деформируемой схемы арки и трещинообразования, изменяющегося при возрастании нагрузки (значения в скобках), составил от -2,47 см до 3,03 см.

Таблица 1

Результаты расчёта модели арки А-3 (симметричное нагружение)

№ КЭ	Эксцентриситет, см			
	Ст.7	Ст.9	Ст.12	Ст.14
13	1,96 (2,10)	2,13 (2,38)	2,32 (2,70)	2,42 (2,84)
28	-0,51 (-0,29)	-0,57 (-0,02)	-0,63 (0,02)	-0,67 (0,02)
33	-2,33 (-1,96)	-2,60 (-2,00)	-2,91 (-2,40)	-3,07 (-2,34)
49	-0,64 (-0,45)	-0,62 (-0,16)	-0,59 (-0,05)	-0,56 (-0,02)
67	-2,33 (-2,18)	-2,60 (-2,15)	-2,91 (-2,33)	-3,07 (-2,47)
72	-0,51 (-0,36)	-0,57 (0,02)	-0,63 (0,01)	-0,67 (-0,02)
87	1,96 (2,07)	2,13 (2,44)	2,32 (2,82)	2,42 (3,03)

В таблицах 2 и 3 представлены результаты, полученные для арок при несимметричном нагружении. Для модели арки А-1 диапазон изменения эксцентриситета при упругом расчёте (ст.8) составил от -4,19 см до 2,46 см (продольная сила N действует за пределами сечения арки), а при нелинейном расчёте, составил от -1,19 см до 5,70 см. В модели арки А-2 диапазон изменения эксцентриситета при упругом расчёте (ст.11) составил от -3,76 см до 2,47 см (продольная сила N действует за пределами сечения арки), а при нелинейном расчёте, составил от -1,67 см до 4,90 см.

Таблица 2

Результаты расчёта модели арки А-1
(загружение в четверти пролёта траверсы)

№ КЭ	Эксцентриситет, см			
	Ст.3	Ст.5	Ст.7	Ст.8
19	1,42 (1,63)	1,90 (2,57)	2,29 (3,66)	2,46 (5,70)
49	-0,68 (-0,44)	-0,59 (-0,10)	-0,52 (0,39)	0,00 (3,28)
64	-1,86 (-1,52)	-2,56 (-2,14)	-3,15 (-2,65)	-3,42 (-0,10)
67	-2,13 (-1,79)	-3,07 (-2,68)	-3,85 (-3,44)	-4,19 (-1,19)
71	-1,48 (-1,14)	-2,13 (-1,75)	-2,66 (-2,26)	-2,88 (-0,11)
89	0,75 (0,87)	0,80 (0,93)	0,84 (0,99)	0,86 (1,97)

Таблица 3

Результаты расчёта модели арки А-2
(загружение в трети пролёта траверсы)

№ КЭ	Эксцентриситет, см			
	Ст.4	Ст.7	Ст.9	Ст.11
18	1,49 (1,65)	1,99 (3,27)	2,25 (4,14)	2,47 (4,90)
49	-0,71 (-0,42)	-0,63 (1,13)	-0,58 (1,68)	-0,55 (2,83)
61	-1,56 (-1,24)	-2,05 (-0,46)	-2,31 (-0,39)	-2,53 (-0,01)
68	-2,06 (-1,74)	-2,93 (-1,64)	-3,38 (-1,78)	-3,76 (-1,67)
73	-0,10 (-0,71)	-1,50 (-0,27)	-1,75 (-0,32)	-1,96 (0,00)
89	0,91 (1,05)	1,05 (1,62)	1,13 (1,79)	1,19 (2,06)

Изогнутая ось арки при несимметричном нагружении для упругого расчёта модели арки А-1 качественно и количественно отличается от

изогнутой оси арки, полученной при нелинейном расчёте. Максимальный эксцентриситет при упругом расчёте находится в сечении правой полуарки (КЭ№67), в то время как при нелинейном расчёте максимальный эксцентриситет расположен в сечении левой полуарки (КЭ№19). Аналогичная картина наблюдается и при анализе изменения эксцентриситета при нагружении модели арки А-2.

Выводы. Напряженно-деформированное состояние арок, нагруженных несимметричной нагрузкой качественно и количественно отличается от арок, нагруженных симметричной нагрузкой. В процессе нагружения происходит перераспределение внутренних усилий, о чем свидетельствует изменение эксцентриситета по величине и даже по знаку. Изогнутая ось арки при несимметричном нагружении для упругого расчёта моделей арок А-1 и А-2 качественно и количественно отличается от изогнутой оси арки, полученной при нелинейном расчёте. Уточняющие расчёты с учётом деформируемой схемы и образования трещин показывают реальную картину напряжённо-деформированного состояния арки, поэтому для реального проектирования следует вести расчёт арок с учётом физической и геометрической нелинейностей.

1. Григолюк Э.И. К расчету устойчивости пологих арок // Инженерный сборник. Издательство АН СССР, 1951. – Том IX. – С.177-200. 2. Мануйлов Г.А., Косицын С.Б., Бегичев М.М. Исследование устойчивости круговых двухшарнирных арок с учётом влияния начальных несовершенств // Строительная механика и расчёт сооружений, 2009. – №1. – С.17-23. 3. Мануйлов Г.А., Косицын С.Б., Ильюшин Н.И. Исследование устойчивости круговых арок с жёстко заделанными концами под действием сосредоточенной силы // Вестник МИИТ. – М.: Издательство МИИТ, 2006. – Вып. 13. – С.82-89. 4. Алексеенко А.Г. Снеговые и ветровые нагрузки на арочные конструкции: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Владивосток, 2005. – 24 с. 5. Хизанишвили А.Л. Экспериментально-теоретическое исследование несущей способности железобетонных арок с учётом перераспределения усилий вследствие пластических деформаций арматуры и бетона: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Тбилиси, 1967. – 22 с. 6. Пушкарь Н.В., Хасеин Джухад Салман Аль-Амери, Сабир Юсиф Бакир. Технологическая повреждённость бетона, армированного полипропиленовым волокном // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2013. – Вип.25. – С.127-132. 7. 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. 8. 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.