

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ АРОК

**Варич А.С.** (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

**Наведені експериментальні дослідження стійкості на моделях арок під дією вертикального навантаження за різних контурних умов і геометричних параметрів.**

Геометрические параметры и жесткостные характеристики моделей арок, испытанных на действие вертикальной равномерно-распределенной нагрузки (таблица 1), приведены для бесшарнирных круговых арок [1].

Таблица 1

№ модели	$2\alpha$	$l$ , см	$f$ , см	$EI$ , кг/см <sup>2</sup>	$qI_{кр}$ , кг	$K$
1	60°	401	53,7	143000	64,0	74,2
2	90°	401	83,0	113000	67,4	95,8
3	120°	401	117,0	106000	68,0	103,0
4	150°	401	153,8	85000	50,2	95,2
5	180°	401	200,5	54000	24,8	74,0

В таблице 2 приведено испытание модели 2. Начальная нагрузка составляла 40 кг, при которой с помощью мессур была отмечена незначительная симметричная деформация арки. Каждая из последующих нагрузок, увеличивалась на 0,5 кг в каждой из десяти точек, или на 5 кг на всю арку. Предельная общая нагрузка на арку была доведена до 67 кг.

Таким образом, наибольшая величина прогиба в ключе арки без потери устойчивости составляла 4,2 см при подъеме арки  $h = 83$  см и длине пролета  $l = 401$  см. Нагрузке  $qI = 67$  кг соответствовала симметричная деформация рис. 1.

Таблица 2

№ п/п	Нагрузка, кг	Прогибы арки, см		
		$\frac{1}{4}$ пролета	$\frac{1}{2}$ пролета	$\frac{3}{4}$ пролета
1	40	0,58	0,85	0,56
2	45	0,60	1,27	0,57
3	50	0,73	1,74	0,70
4	55	0,85	2,28	0,82
5	60	1,00	3,00	0,97
6	65	1,15	3,80	1,14
7	67	1,23	4,20	1,25
8	68	1,05	3,95	1,4

При увеличении груза на каждую подвеску на 0,10 кг, т. е. при общей нагрузке на арку 68 кг, арка потеряла устойчивость и склонилась набок (рис.1). Дальнейшему увеличению нагрузки соответствовала интенсивная асимметричная деформация арки.

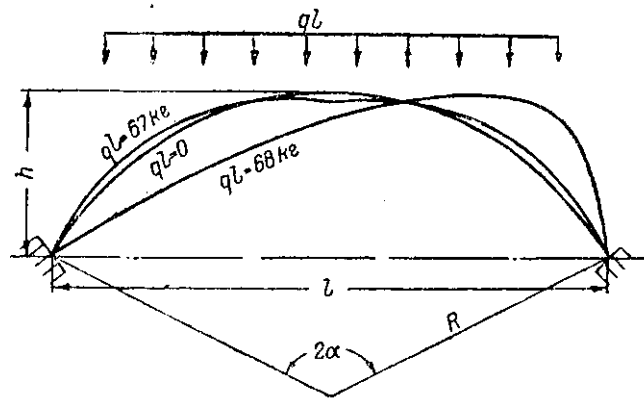


Рис. 1 Деформирование модели арки № 2

Таким образом, изогнутая симметричная арка перешла в изогнутую асимметричную. В этом случае потеря устойчивости произошла в смысле Эйлера, сопровождаясь сменой форм равновесия. Критическая нагрузка, из опыта, равна:  $q_{кр} = 0,168$  кг/см. Следовательно, коэффициент устойчивости из опыта будет:  $K = ql^3/(EI) = 95,8$ .

Опыты, проведенные над устойчивостью бесшарнирных круговых арок, показали, что критическому состоянию арки при загрузке ее равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета соответствует появление несимметричной деформации.

Потеря устойчивости в данном случае сопровождается сменой формы равновесия, но не сжатой в изогнутую, как в классических задачах Эйлера, а симметричной изогнутой в изогнутую, но асимметричную [2].

Во время испытания арок были замечены лишь незначительные прогибы. Критическая форма изогнутой оси незначительно отличалась от исходной формы арки. Это обстоятельство дает основание при определении критической силы аналитическим путем производить замену в уравнениях равновесия критической конфигурации исходной.

На рис. 2 и в таблице 3 приведена зависимость коэффициента устойчивости  $K$  от  $h/l$ , полученная опытным путем.

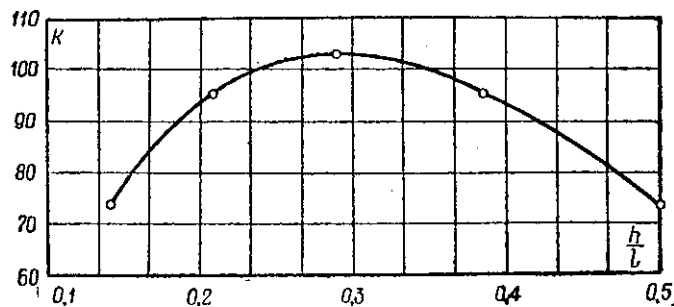


Рис. 2 Зависимость коэффициента устойчивости  $K$  от  $h/l$

Таблица 3

$2\alpha$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$	$180^\circ$
$K$	74,2	95,8	103	95,2	74

В работе [3] выполнены опыты по устойчивости сжато-изогнутых упругих трехшарнирных арок. Эксперименты были произведены над тонкими гибкими арками, изготовленными из полос рессорной стали. Ширина полос колебалась в пределах от 38 до 40 мм и толщина от 4 до 6 мм. Длина пролета для всех случаев была равной 401 см.

Были произведены опыты над моделями арок с углом раствора  $2\alpha = 60, 74, 106, 120, 134, 150$  и  $180^\circ$ .

Первый опыт для каждой модели арки был произведен при действии на нее одной сосредоточенной силы, приложенной в ключе. Последующие опыты производились так: в начале опыта все грузовые сосуды, кроме ключевого, загружались через воронки равными весами воды. После этого через воронку и загружался водой грузовой сосуд ключевого шарнира до тех пор, пока не исчерпывалась несущая способность арки. Во всех случаях потеря устойчивости характеризовалась мгновенным прощелкиванием арки.

После произведенного опыта ключевой шарнир разгружали и арку приводили в исходное положение. Затем увеличивали грузы во всех точках, кроме ключевого шарнира, и только потом снова загружали ключевой шарнир до исчерпания аркой несущей способности.

Опыты над аркой проводились до тех пор, пока равномерно распределенная нагрузка не достигала максимального значения  $q_{кр}$ , т.е. соответствующего отсутствию нагрузки в ключевом шарнире. Таким образом, в опытах отношение сосредоточенной нагрузки  $P$ , приложенной в ключевом шарнире, к общей нагрузке  $P + ql$ , изменялось в пределах от  $P/(P+ql)=1$  до  $P/(P+ql)=0$ . С увеличением равномерно распределенной нагрузки сосредоточенная сила  $P$ , приложенная в ключевом шарнире и соответствующая потере устойчивости арки, уменьшалась.

В результате произведенных опытов над семью моделями арок, были получены зависимости между коэффициентом устойчивости  $K$  и величиной отношения  $\omega = P/(P+ql)$  (табл. 4).

Графическая зависимость между  $\omega$  и  $K$ , если значение коэффициента  $K$  представить в зависимости от высоты подъема  $h$  и длины пролета арки  $l$ , представлена на рис. 3

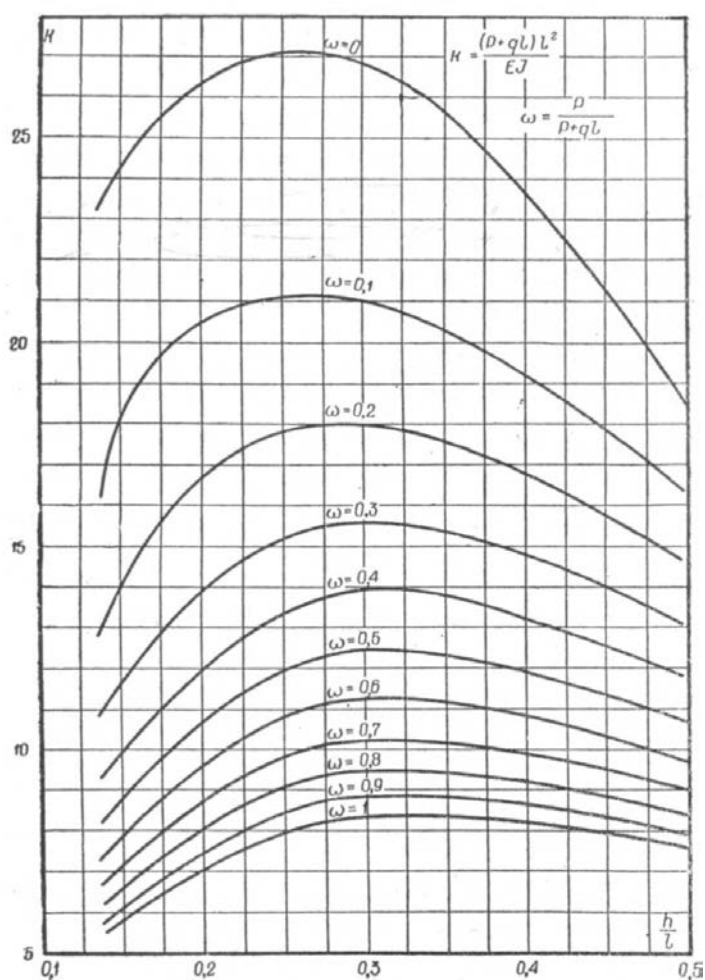
Из таблицы 4 и из кривых, изображенных на рис.3, видно, что при возрастании  $h/l$  устойчивость арки сначала увеличивается, достигает максимума при  $h/l = 0,3$  (приблизительно), а затем начинает падать.

Целью экспериментальных исследований [4] являлась проверка гипотезы о повышении устойчивости рядовых арок при включении в их работу стабилизирующих нитей и изучение работы этих арок при различных загрузках покрытия.

Модель размером в плане  $3 \times 4$  м имела масштаб подобия 1:8, но по сравнению с реальным сооружением имела меньшее количество арок - 3. Пролет арок - 2,95 м, высота подъема - 1,05 м, очертание оси - окружность радиусом 1,56 м. Сечение - стальная труба с наружным диаметром 21,3 мм и толщиной стенки 2,3 мм. Шаг арок - 1,5 м. Несущие нити изготовлялись из высокопрочной проволоки диаметром 4 мм. Пролет нитей - 1,5 м, стрела провисания до преднапряжения - 6 см (1 / 25). Количество несущих нитей на покрытие - 10. Стабилизирующими нитями и оттяжками служила гладкая арматура А 240С диаметром 10 мм. Основание модели - рама, которая собиралась из швеллеров № 12 и имела размеры в плане  $3 \times 4$  м. Для увеличения жесткости рама во всех плоскостях развязывалась крестовыми связями. Крайние арки были усилены стойками фахверка из швеллера № 6,5.

Таблица 4

h/l	2α	ω										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,134	60°	23,2	16,2	12,8	10,8	9,3	8,2	7,3	6,60	6,10	5,70	5,40
0,167	74°	25,2	19,5	15,3	12,5	10,7	9,5	8,6	7,85	7,30	6,70	6,31
0,249	106°	27,1	21,1	17,8	15,2	13,4	12,0	10,8	9,90	9,10	8,50	8,00
0,288	120°	27,1	21,0	18,0	15,6	13,9	12,4	11,2	10,20	9,40	8,80	8,30
0,332	134°	26,2	20,6	17,8	15,5	13,8	12,4	11,2	10,20	9,40	8,80	8,28
0,34	150°	24,3	19,6	17,1	15,0	13,4	12,0	10,9	9,95	9,25	8,70	8,25
0,5	180°	18,5	16,3	14,6	13,1	11,8	10,6	9,75	9,00	8,40	7,90	7,55

Рис. 3 График зависимости между коэффициентом устойчивости  $K$  и величиной отношения  $\omega = P/(P+ql)$

Геометрические характеристики сечений элементов модели следующие:

Несущие нити	$EI_x = EI_y = 0,0029 \text{ кНм}^2$ $GIk = 0,0003 \text{ кНм}^2$ $EA = 2640 \text{ кН}$
Арки	$EI_x = EI_y = 1,4416 \text{ кНм}^2$ $GIk = 0,7159 \text{ кНм}^2$ $EA = 34230 \text{ кН}$
Оттяжки и стабилизирующие нити	$EI_x = EI_y = 0,1030 \text{ кНм}^2$ $GIk = 0,0824 \text{ кНм}^2$ $EA = 16490 \text{ кН}$

Нагружение покрытия производилось с помощью подвесок, представляющих собой арматурный стержень, на одном конце которого имелся крюк, а на втором – чашечка для укладывания груза. На каждую несущую нить предусматривалось по две подвески; крайние нити не загружались, так как угол касательной к оси арки у крайних нитей не более  $50^\circ$  и, следовательно, снеговая нагрузка отсутствует.

Работа арки исследовалась при загрузении покрытия по пяти схемам загрузки: загружена четверть покрытия; половина вдоль сооружения; половина поперек сооружения; полное загрузение; загрузение сосредоточенными силами в коньке средней (рядовой) арки. Постоянная равномерно распределенная нагрузка на покрытие составила  $175 \text{ Н/м}^2$ , временная, прикладываемая в 4 этапа, соответственно 158, 753, 910,  $1059 \text{ Н/м}^2$ . Сосредоточенная сила в коньке арки была равна по этапам: 300, 600, 900 Н.

Максимальные прогибы в рядовой арке возникали при половинном вдоль покрытия загрузении. Эпюра прогибов рядовой арки при данном загрузении показана на рис.4, кривая 2. Наибольшее значение прогиба наблюдалось в загрузенной половине арки на расстоянии  $1/3$  от опоры и равнялось 3,3 см ( $1/90$ ). В незагрузенной половине максимальный прогиб был равен 3,2 см ( $1/92$ ) и возникал на расстоянии  $1/4,5$  от опоры. Наибольший прогиб этой же арки без преднапряжения был равен 5,1 см, больший на 55 %, чем у напряженной арки.

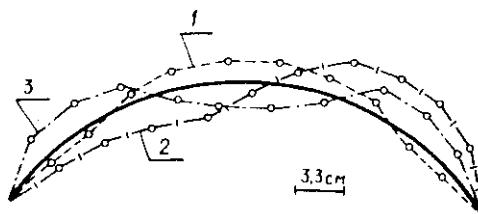


Рис. 4 Эпюры прогибов арки при: 1 – преднапряжении;  
2 – половинном загрузении вдоль покрытия;  
3 – полном загрузении.

Отношение прогибов преднапряженной и непреднапряженной арки для всех измеряемых точек равнялось в среднем 0,6 при максимальном отклонении от среднего значения 24 %. Это позволило сделать вывод, что коэффициент упругой среды, создаваемой стабилизирующими нитями, постоянен по длине арки. Зависимость нарастания прогибов от нагрузки практически линейна (отклонение от прямой - 3 %). Это означает, что коэффициент упругой среды постоянен и не зависит от внешней нагрузки.

При дальнейшем загрузении модели (более  $1059 \text{ кН/м}$ ) прогибы средней арки резко возросли, что означало потерю устойчивости арки второго рода. Новый этап загрузения не был даже окончен. Перед этим этапом потеря устойчивости ожидалась. Внешне она проявилась тем, что при легком ударе по рядовой арке рукой арка начинала очень медленно совершать волнообразные колебания с частотой 1 колебание за 2 – 4 с.

Крайние нити загрузенной половины покрытия выбирают за счет уменьшения своего натяжения ослабления стабилизирующих нитей, не позволяя тем самым выбирать эту слабиную аркам. Крайние нити незагрузенной половины создают упругое сопротивление

выпучиванию незагруженной части арки, выступая, следовательно, в качестве дополнительной упругой опоры.

Полное нагружение покрытия не явилось расчетным для рядовой арки, однако подобное нагружение наиболее вероятное при эксплуатации покрытия. Эпюра прогибов арки при полном нагружении показана на рис 4, кривая 3, Максимальный прогиб возникал в коньке арки и был равен 1,5 см ( $l/197$ ) или 45 % от максимального прогиба при половинном нагружении. Здесь необходимо отметить, что при полном нагружении провоцируется потеря устойчивости второго рода, сопровождаемая переходом к несмежной форме равновесия. Однако при дополнительном нагружении потери устойчивости не произошло. Об этом можно было судить как по величине прогиба в коньке арки - 2,6 см ( $l/113$ ), так и по тому, что в крайних волокнах арки появилась текучесть материала, что говорило о наступлении предельного состояния по прочности.

График нарастания прогибов при росте нагрузки так же как и при половинном нагружении практически линеен (отклонение от прямой 6,7 %).

Эпюра прогибов при действии сосредоточенного груза почти повторяет эпюру прогибов при полном нагружении. Максимальный прогиб возникал в коньке и равнялся 1,1 см или  $l/268$ .

### ***Выводы***

1. При симметричном исходном состоянии увеличение нагрузки может привести к несимметричной потере устойчивости.

2. Коэффициент устойчивости  $K$  для пологих арок возрастает до 103 (отношение  $h/l$  приблизительно равно 0.3 - непологие арки) и при росте этого отношения уменьшается до 74.2 ( $h/l = 0.5$ ).

### **Summary**

**The experimental researches in stability under the vertical loading on the arch models are represented in article.**

### ***Литература***

1. Павленко Г.Л. Устойчивость бесшарнирных круговых арок, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета. / Научные труды Днепропетровского металлургического института, вып. 17, 1949. – С. 36 – 57
2. Андреев А.В., Ободан Н.И., Лебедев А.Г. Устойчивость оболочек при неосесимметричной деформации. - М.: Наука, 1988. - 208 с.
3. Павленко Г.Л. Опыты по устойчивости сжато-изогнутых упругих трехшарнирных арок. / Научные труды Днепропетровского металлургического института, вып. 17, 1949. – С. 21 – 35
4. Кочетов В.А. Экспериментальные исследования устойчивости двухшарнирной рядовой арки в системе многопролетного висячего покрытия. / «Экспериментальные исследования и расчет строительных конструкций» - М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1986. – С. 75 – 81.