

К РАСЧЕТУ АРОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ВЕТРОВУЮ НАГРУЗКУ

В статье рассматривается распределение интенсивности ветровой нагрузки по поверхности арочной конструкции. Предлагается определять аэродинамический коэффициент при расчете арки на ветровую нагрузку с помощью функции параболического типа. Приводятся результаты сравнительного расчета стальной арки, выполненного с применением существующего и предлагаемого способа определения аэродинамического коэффициента.

Ключевые слова: арочная конструкция, ветровая нагрузка, аэродинамический коэффициент.

Определение ветровой нагрузки на арочные конструкции осуществляется в соответствии со СНиП «Нагрузки и воздействия» [1]. В Приложении 4 [1] приведена схема распределения ветрового давления на сводчатые покрытия, согласно которой криволинейная поверхность разбита на три зоны: зона активного давления (в дальнейшем – зона 1), занимающая часть наветренной стороны до высоты $0,7f$ (f – стрела подъема арки), две другие – зоны пассивного давления: центральная зона (в дальнейшем – зона 2), находящаяся выше, чем $0,7f$, и зона в подветренной стороне, симметричная зоне активного давления (в дальнейшем – зона 3). Величину интенсивности ветрового давления при прочих равных условиях определяет аэродинамический коэффициент c . Числовые значения этого коэффициента принимаются в каждой зоне постоянными по величине. При этом в точках перехода из одной зоны в другую аэродинамический коэффициент (следовательно, и интенсивность ветровой нагрузки) изменяется скачком, а при переходе из зоны 1 в зону 2 – даже с переменной знака. Очевидно, что в действительности при гладкой поверхности арки таких резких изменений интенсивности давления быть не может. Вопросы величины аэродинамических коэффициентов были предметом обсуждения в литературе [2], [3], [4], [5]. Однако закономерности изменения величины аэродинамического коэффициента по криволинейной поверхности должного внимания не уделялось.

В предлагаемой статье автор предпринял попытку исследования влияния замены схемы ступенчатого распределения величины аэродинамического коэффициента, принятой СНиП, на схему с изменяющейся по квадратной параболы величиной этого коэффициента. На ри-

сунке 1 приведена сравнительная картина распределения величины аэродинамического коэффициента по развертке арки: штриховой линией показано распределение по СНиП, сплошной – распределение по параболе.

Величина аэродинамического коэффициента в узловых точках арки в предлагаемой схеме определена исходя из следующих условий:

$$\int_0^{s_1} p(s) \cdot ds = c_{e1} \cdot s_1, \quad (1)$$

$$\int_{s_1}^{s_2} p(s) \cdot ds = c_{e2} \cdot (s_2 - s_1), \quad (2)$$

$$\int_{s_2}^{s_3} p(s) \cdot ds = c_e \cdot (s_3 - s_2), \quad (3)$$

где s_1, s_2, s_3 – координаты, соответственно, концов 1, 2, 3 зон (начало координат принято в начале зоны 1),

$p(s)$ – функция, описывающая изменение величины аэродинамического коэффициента в пределах каждой зоны:

в зоне 1 -

$$p(s) = a_1 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + c_1, \quad (4)$$

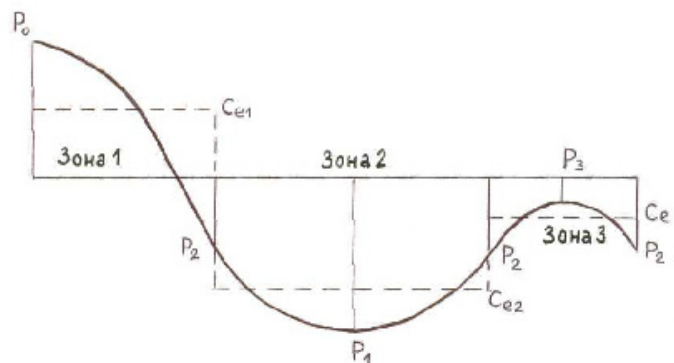


Рисунок 1. Схема распределения интенсивности ветрового давления

в зоне 2 -

$$p(s) = a_2 \cdot s^2 + b_2 \cdot s + c_2, \quad (5)$$

в зоне 3 -

$$p(s) = a_3 \cdot s^2 + b_3 \cdot s + c_3, \quad (6)$$

c_{e1} , c_{e2} , c_e – величина аэродинамического коэффициента, соответственно, в 1, 2, 3 зонах по СНиП.

Кроме того, были приняты следующие условия:

$$\frac{dp(s)}{ds} = 0 \text{ при } s=0, \text{ при } s = \frac{s_1+s_2}{2} \text{ и при } s = \frac{s_2+s_3}{2}, \quad (7)$$

а также

$$P_2 = \frac{c_e + c_{e2}}{2}. \quad (8)$$

Величины аэродинамического коэффициента в узловых точках арки из решения уравнений (1)-(3) с учетом условий (7,8) определяются выражениями:

$$P_0 = \frac{6 \cdot c_{e1} - c_e - c_{e2}}{4}, \quad (9)$$

$$P_1 = \frac{5 \cdot c_{e2} - c_e}{4}, \quad (10)$$

$$P_3 = \frac{5 \cdot c_e - c_{e2}}{4}. \quad (11)$$

Коэффициенты квадратичной функции в пределах каждой зоны определяются из следующих условий:

$$p(0) = c_1 = P_0, \quad (12)$$

$$\frac{dp(0)}{ds} = b_1 = 0, \quad (13)$$

$$p(s_1) = a_1 \cdot s_1^2 + b_1 \cdot s_1 + c_1 = P_2, \quad (14)$$

$$p(s_1) = a_2 \cdot s_1^2 + b_2 \cdot s_1 + c_2 = P_2, \quad (15)$$

$$p(s_2) = a_2 \cdot s_2^2 + b_2 \cdot s_2 + c_2 = P_2, \quad (16)$$

$$p\left(\frac{s_1+s_2}{2}\right) = a_2 \left(\frac{s_1+s_2}{2}\right)^2 + b_2 \left(\frac{s_1+s_2}{2}\right) + c_2 = P_1, \quad (17)$$

$$p(s_2) = a_3 \cdot s_2^2 + b_3 \cdot s_2 + c_3 = P_2, \quad (18)$$

$$p(s_3) = a_3 \cdot s_3^2 + b_3 \cdot s_3 + c_3 = P_2, \quad (19)$$

$$p\left(\frac{s_2+s_3}{2}\right) = a_3 \left(\frac{s_2+s_3}{2}\right)^2 + b_3 \left(\frac{s_2+s_3}{2}\right) + c_3 = P_3. \quad (20)$$

В результате решения системы уравнений получены коэффициенты искомой функции $p(s)$:

$$a_1 = \frac{P_2 - P_0}{s_1^2}, \quad (21)$$

$$b_1 = 0, \quad (22)$$

$$c_1 = P_0, \quad (23)$$

$$a_2 = \frac{4(P_2 - P_1)}{(s_1 - s_2)^2}, \quad (24)$$

$$b_2 = \frac{4(P_1 - P_2)(s_1 + s_2)}{(s_1 - s_2)^2}, \quad (25)$$

$$c_2 = P_2 + \frac{4(P_2 - P_1)(s_1 \cdot s_2)}{(s_1 - s_2)^2}, \quad (26)$$

$$a_3 = \frac{P_2 - P_3}{s_1^2}, \quad (27)$$

$$b_3 = \frac{2(P_3 - P_2) \cdot s_3}{s_1^2}, \quad (28)$$

$$c_3 = \frac{P_3(s_1^2 - s_3^2) + P_2 \cdot s_3^2}{s_1^2}. \quad (29)$$

Предлагаемая функция распределения величины аэродинамического коэффициента была использована для определения влияния ветровой нагрузки на арку. С этой целью составлена компьютерная программа вычисления величин аэродинамического коэффициента в узлах арки. В качестве числовой модели была рассмотрена очерченная по дуге окружности арка с пролетом 16 м, изготовленная из стального двутавра 40Б1. Ось арки была разбита на 64 равных по длине участка. Величина расчетной ветровой нагрузки условно принята равной $10 \cdot p(s)$ кН/м.

Расчеты арки со стрелой подъема 8 м выполнены от ветровой нагрузки, распределенной по СНиП и по параболе. На рисунке 2 показан вид эпюр распределения горизонтальной составляющей интенсивности ветрового давления p_x по развертке арке (штриховой линией 1 показана эпюра при распределении по СНиП, сплошной 2 – при параболическом распределении). Как видно, интенсивность горизонтальной составляющей ветрового давления, наиболее ответственной за отклонение деформированной оси арки от симметрии, при обоих рассматриваемых способах распределения величины аэродинамического коэффициента совпада-

ет только в зоне 2. При применении параболического распределения изменение интенсивности горизонтального давления на границах зон существенно сглажено. Как отразилась замена способа распределения на величине изгибающих моментов, возникающих в арке при действии ветровой нагрузки, видно из рассмотренного рисунка 3, на котором показаны эпюры изгибающих моментов. Как и на рисунках 1 и 2, эпюра для распределения по СНиП показана штриховой (1), а для распределения по параболе – сплошной (2) линией. Конфигурация эпюр практически совпадает, что очевидно, поскольку при подборе функции принято условие равенства равнодействующих ветровой нагрузки в обоих способах распределения. Также понятно, что расчетная (наибольшая) величина изгибающих моментов в арке при параболическом распределении несколько меньше, чем при распределении по СНиП (за счет устранения скачков интенсивности нагрузки).

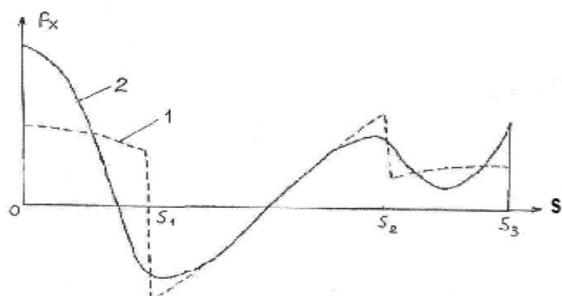


Рисунок 2. Эпюры горизонтальной составляющей ветровой нагрузки: 1 – при распределении по СНиП, 2 – при распределении по параболе

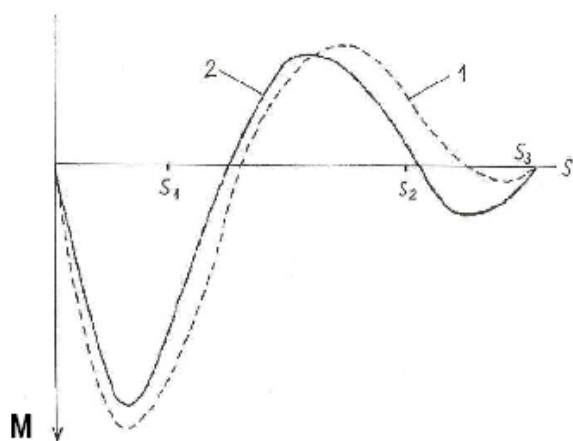


Рисунок 3. Эпюры изгибающих моментов в арке: 1 – при распределении по СНиП, 2 – при распределении по параболе

В таблице 1 приведены некоторые результаты расчетов подъемистой арки (стрела подъема 8 м) при двух способах распределения ветровой нагрузки. Положительной принята горизонтальная составляющая давления, совпадающая с направлением ветра, вертикальная – направленная вниз; положительными приняты изгибающие моменты, разгибающие арку, а продольные силы – растягивающие арку.

Участок 16 – последний в зоне 1, участок 17 – первый в зоне 2. Участок 48 – последний в зоне 2, участок 49 – первый в зоне 3. На этих участках составляющие давления при способе распределения СНиП резко меняют свою величину. Однако изменение изгибающего момента при использовании схемы СНиП в местах перехода из одной зоны в другую не столь заметно. В то же время разница в величине изгибающих моментов при расчете по разным схемам распределения в этих частях арки наибольшая. Так, разница в величине изгибающих моментов в середине арки составляет 6,7 кНм или 14% от величины изгибающего момента в схеме СНиП, а на участке 16 разница 31,2 кНм или 25%, на участке 49 – 28,6 кНм или 79%. Параболическое распределение дает в среднем некоторое снижение изгибающих моментов (наибольший момент меньше на 10%), но одновременно увеличение продольных сил (наибольшая продольная сила возрастает на 6%), особенно в подветренной части арки (здесь возрастание достигает 15%). Напряжения при распределении по параболе уменьшаются практически на всех участках арки: на наиболее напряженном участке на 10%, а на мало нагруженных участках подветренной стороны более чем в два раза. Наибольшие значения изгибающих моментов в результатах расчета по обеим схемам отмечены на участке 12: по СНиП 147,9 кНм, по предлагаемой схеме 130,0 кНм.

В таблице 2 приведены аналогичные результаты расчетов пологой арки со стрелой подъема 1,6 м (0,1 пролета арки) при той же нагрузке, но с распределением коэффициента аэродинамического с учетом соотношения пролета и высоты арки. Как видно, закономерности в распределении внутренних усилий и напряжений в пологой арке такие же, как и в подъемистой арке.

Таким образом, результаты сравнительного расчета с использованием нормативного и

Таблица 1. Результаты расчета арки кругового очертания с пролетом 16 м и стрелой подъема 8 м

Номер участка	Горизонтальная составляющая интенсивности нагрузки на участке, кН/м		Вертикальная составляющая интенсивности нагрузки на участке, кН/м		Изгибающие моменты на участках, кНм		Продольные силы на участках, кН		Наибольшие напряжения на участках, МПа	
	по СНиП	параболическое	По СНиП	Параболическое	По СНиП	Параболическое	По СНиП	Параболическое	По СНиП	Параболическое
1	2,75	5,66	0,07	0,14	0	0	66	73	11	12
10	2,46	2,00	1,24	1,01	144,5	130,0	83	88	193	176
12	2,32	0,61	1,47	0,39	147,9	130,0	83	88	198	176
16	1,99	-2,28	1,90	-2,17	122,7	91,5	79	82	166	127
17	-3,25	-2,36	-3,41	-2,48	109,8	80,7	72	81	149	114
20	-2,71	-2,39	-3,85	-3,39	68,9	47,3	72	77	98	71
32	-0,12	-0,13	-4,71	-5,49	-47,2	-53,9	58	64	68	78
45	2,71	2,39	-3,85	-3,39	-58,4	-34,0	57	68	82	53
48	3,25	2,36	-3,41	-2,48	-42,7	-15,1	59	70	63	30
49	1,14	2,28	-1,08	-2,17	-36,0	-8,6	60	71	55	22
64	1,57	3,14	-0,04	-0,08	0	0	64	72	14	19

Таблица 2. Результаты расчета арки кругового очертания с пролетом 16 м и стрелой подъема 1,6 м

Номер участка	Горизонтальная составляющая интенсивности нагрузки на участке, кН/м		Вертикальная составляющая интенсивности нагрузки на участке, кН/м		Изгибающие моменты на участках, кНм		Продольные силы на участках, кН		Наибольшие напряжения на участках, МПа	
	По СНиП	Параболическое	По СНиП	Параболическое	По СНиП	Параболическое	По СНиП	Параболическое	По СНиП	Параболическое
1	0,10	0,43	0,24	1,06	0	0	129	137	21	22
9	0,07	0,05	0,25	0,18	21,1	19,4	130	138	47	47
11	0,07	-0,08	0,25	-0,28	21,6	18,4	130	138	48	45
12	0,06	-0,14	0,25	-0,55	21,1	17,2	130	138	47	44
15	0,05	-0,33	0,25	-1,50	16,8	12,2	130	138	42	38
16	-0,42	-0,33	-2,01	-1,59	14,4	10,2	130	138	39	35
20	-0,32	-0,29	-2,03	-1,89	4,9	2,2	129	137	27	25
32	-0,01	-0,01	-2,05	-2,31	-12,2	-13,8	128	137	36	40
45	0,32	0,29	-2,03	-1,89	-11,3	-8,0	128	137	35	32
49	0,42	0,33	-2,01	-1,59	-6,9	-2,8	129	137	30	26
50	0,22	0,33	-1,00	-1,50	-5,5	-1,5	129	137	28	24
64	0,39	0,58	-0,95	-1,42	0	0	129	137	22	24

предлагаемого способов распределения величины аэродинамического коэффициента по поверхности арки при назначении ветровой нагрузки позволяют сделать вывод, что предлагаемый

способ обеспечивает соответствие изменения внутренних сил в арке плавному характеру изменения наклона поверхности арочной конструкции к направлению ветра.

3.02.2012

Список литературы:

1. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия – М.: ГУП ЦПП, 2003 – 44с.
2. Барштейн М.Ф. Ветровая нагрузка на здания и сооружения // Строительная механика и расчет сооружений. – 1974, №4. – С. 43–48.
3. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / ЦНИИСК им В.А. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1978. – 224 с.
4. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. – М.: Стройиздат, 1972. – 110с.
5. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н.Гордеев, А.И.Лантух-Лященко, В.А.Пашинский и др. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 482с.

Сведения об авторе:

Колоколов Сергей Борисович, профессор кафедры строительных конструкций
Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор
460018, Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 3126, тел. (3532) 372524, e-mail: kklksb@yandex.ru

UDC 624.32

Kolokolov S.B.

Orenburg state university, e-mail: kklksb@yandex.ru

ABOUT CALCULATION OF WIND LOAD ON ARCH CONSTRUCTION

The article dedicates to a question of distribute the wind load intensity along arch construction. It is proposed to compute aerodynamic coefficient, while calculating the wind load on arch construction, with use of parabolic type of function. Author shows and analyses the results of comparative calculation of steel arch based on traditional and proposed in the article method of aerodynamic coefficient computing.

Key words: arch construction, wind load, aerodynamic coefficient.

Bibliography:

1. BN&R 2.01.07-85*. Loads and pressure – GUP CPP, 2003 – 44p.
2. Barshtein M.F. Wind load on buildings and constructions. – Building mechanics. – 1974 №4. – P. 43–48.
3. Guide to calculation of buildings and constructions under wind action / V.A.Kucherenko CNIISK. M.:Strojizdat, 1978. – 224 p.
4. Savitsky G.A. Wind load on constructions. M.:Strojizdat, 1972. – 110 p.
5. Loads and pressure on buildings and constructions / V.N.Gordeev, A.i.Lantuch-Liashenko, V.A.Pashinsky and others. – M.: ASV, 2008. – 482 p.