УДК 681.3: 634.04
Семенюк О.С.
Научный руководитель: доцент Игнатюк В.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕСШАРНИРНЫХ КРУГОВЫХ АРОК, ЗАГРУЖЕННЫХ РАДИАЛЬНЫМИ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ НАГРУЗКАМИ

Введение. В практике проектирования находят применение длинные цилиндрические оболочки, выполненные из лёгких материалов. Для таких оболочек особую роль играет ветровая нагрузка, действующая в радиальных направлениях [1]. Расчётная схема длинной цилиндрической оболочки может быть сведена к бесшарнирной арке. Решение задачи расчёта бесшарнирной полукруговой арки на радиальное нагружение равномерно распределённой нагрузкой на всю арку представлено в работе [3]. Таким образом, расчёт бесшарнирных арок кругового очертания на действие радиально направленных равномерно распределённых нагрузок (рис. 1) актуален и представляет интерес.

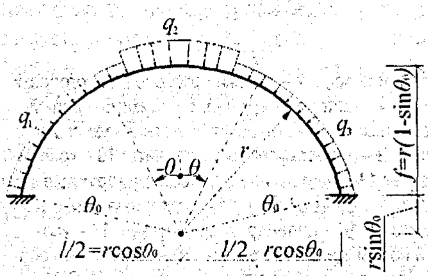


Рисунок 1 – Расчётная схема

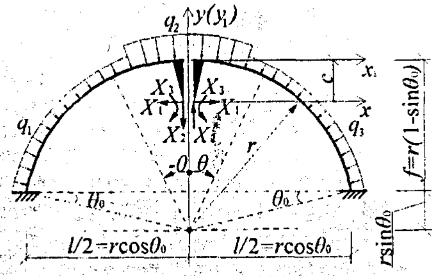


Рисунок 2 – Основная система метода сил

Постановка задачи. Рассмотрим задачу определения усилий и деформаций в бесшарнирных арках постоянной жёсткости кругового очертания при статическом действии произвольного количества радиально направленных равномерно распределённых нагрузок (рис. 1). Для решения задачи используется метод сил с переносом неизвестных в упругий центр (рис. 2). Учитывая, что рассматриваются круговые арки, для упрощения вычисления интегралов Мора воспользуемся полярной системой координат. За полюс принимается точка в центре окружности (точка О), а в качестве оси, относительно которой будем отсчитывать угол (θ), примем вертикальную ось, направленную от полюса вертикально вверх.

Получение расчётных зависимостей. Зависимость между декартовой (x, y) и полярной (r, θ) системами координат здесь имеет вид:

$$\begin{cases} x = r\sin\theta; \\ y = c + y_1 = c - r(1-\cos\theta), \end{cases}$$

где $y_1 = -r(1-\cos\theta)$; c – расстояние от верхней средней точки до упругого центра, определяемое выражением [2]:

$$c = \frac{\int y_1 ds}{\int \frac{ds}{EI}} = \frac{\int \frac{[r(1-\cos\theta)] r d\theta}{EI}}{\int \frac{r d\theta}{EI}} = \frac{\int \frac{[r(1-\cos\theta)] d\theta}{EI}}{\int \frac{d\theta}{EI}}.$$

Бесшарнирная арка как статически неопределимая система имеет три лишних связи. Система канонических уравнений метода сил будет иметь вид [2]:

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1+\Delta_{1p}=0; \\ \delta_{22}X_2+\Delta_{2p}=0; \\ \delta_{33}X_3+\Delta_{3p}=0. \end{cases} \tag{1}$$

Выражения для усилий в сечениях основной системы метода сил от действия единичных неизвестных имеет вид:

$$\begin{aligned} &\overline{M}_1=c-r(1-\cos\theta); \quad \overline{Q}_1=\sin\theta; \quad \overline{N}_1=-\cos\theta; \\ &\overline{M}_2=r\sin\theta; \quad \overline{Q}_2=-\cos\theta; \quad \overline{N}_2=-\sin\theta; \\ &\overline{M}_3=1; \quad \overline{Q}_3=0; \quad \overline{N}_3=0. \end{aligned} \tag{2}$$

Единичные перемещения вычислим по формуле Мора [2]:

$$\delta_{ik}=\int_0^s\frac{\overline{M}_i\overline{M}_k ds}{EI}+\int_0^s\eta\frac{\overline{Q}_i\overline{Q}_k ds}{GA}+\int_0^s\frac{\overline{N}_i\overline{N}_k ds}{EA}, \tag{3}$$

где EI, GA, EA – жёсткости сечений арки соответственно на изгиб, сдвиг и растяжение-сжатие; η – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по высоте сечений при изгибе.

Подставив выражения (2) в (3), учитывая, что $ds=rd\theta$ (рис. 2), и выполнив интегрирование, получим единичные перемещения в виде:

$$\begin{aligned} &\delta_{11}=\frac{r}{EI}\left\{(\frac{\pi}{2}-\theta_0)\left[2(c-r)^2+r^2\right]+4r(c-r)\cos\theta_0+\frac{1}{2}r^2\sin2\theta_0\right\}+ \\ &+\eta\frac{r}{GA}\left[(\frac{\pi}{2}-\theta_0)-\frac{1}{2}\sin2\theta_0\right]+\frac{r}{EA}\left[(\frac{\pi}{2}-\theta_0)+\frac{1}{2}\sin2\theta_0\right]; \\ &\delta_{22}=\frac{r^3}{EI}\left[(\frac{\pi}{2}-\theta_0)-\frac{1}{2}\sin2\theta_0\right]+\frac{r}{GA}\eta\left[(\frac{\pi}{2}-\theta_0)+\frac{1}{2}\sin2\theta_0\right]+\frac{r}{EA}\left[(\frac{\pi}{2}-\theta_0)-\frac{1}{2}\sin2\theta_0\right]; \\ &\delta_{33}=\frac{2r}{EI}(\frac{\pi}{2}-\theta_0). \end{aligned} \tag{4}$$

Грузовые перемещения найдём по формулам Мора [2]:

$$\Delta_{ip}=\sum\int\frac{\overline{M}_i M_p ds}{EI}+\sum\int\eta\frac{\overline{Q}_i Q_p ds}{GA}+\sum\int\frac{\overline{N}_i N_p ds}{EA}. \tag{5}$$

Для получения выражений внутренних сил в произвольном сечении (θ) от действия внешних радиально направленных равномерно распределённых нагрузок было рассмотрено равновесие правой и левой частей арок относительно сечения, и они были выражены через элементарные нагрузки на бесконечно малых участках $ds = rd\varphi$ (рис. 3, а, б). После интегрирования составленных выражений в пределах действия нагрузок получили:

$$\begin{aligned} M_p^{II}=&\sum_{i=1}^{n_q^{II}}q_i r^2\left[\sin\theta(\sin\theta_i^K-\sin\theta_i^H)+\cos\theta(\cos\theta_i^K-\cos\theta_i^H)\right]+ \\ &+q_i r^2(1-\sin\theta\sin\theta_i^H-\cos\theta\cos\theta_i^H); \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} M_p^{Л}=&-\sum_{j=1}^{n_q^{Л}}q_j r^2\left[\sin\theta(\sin\theta_j^K-\sin\theta_j^H)+\cos\theta(\cos\theta_j^K-\cos\theta_j^H)\right]+ \\ &+q_j r^2(1-\sin\theta\sin\theta_j^K-\cos\theta\cos\theta_j^K); \end{aligned} \tag{7}$$

$$Q^{П}_{p}=-\sum_{i=1}^{n_q^П} q_i r\left[\cos\theta(\sin\theta_i^K-\sin\theta_i^H)-\sin\theta(\cos\theta_i^K-\cos\theta_i^H)\right]+ \qquad (8)$$
$$+q_i r(\cos\theta\sin\theta_i^H-\sin\theta\cos\theta_i^H);$$

$$Q^{Л}_{p}=\sum_{j=1}^{n_q^Л} q_j r\left[\cos\theta(\sin\theta_j^K-\sin\theta_j^H)-\sin\theta(\cos\theta_j^K-\cos\theta_j^H)\right]+ \qquad (9)$$
$$+q_j r(\cos\theta\sin\theta_j^K-\sin\theta\cos\theta_j^K);$$

$$N^{П}_{p}=-\sum_{i=1}^{n_q^П} q_i r\left[\sin\theta(\sin\theta_i^K-\sin\theta_i^H)+\cos\theta(\cos\theta_i^K-\cos\theta_i^H)\right]- \qquad (10)$$
$$-q_i r(1-\sin\theta\sin\theta_i^H-\cos\theta\cos\theta_i^H);$$

$$N^{Л}_{p}=-\sum_{j=1}^{n_q^Л} q_j r\left[\sin\theta(\sin\theta_j^K-\sin\theta_j^H)+\cos\theta(\cos\theta_j^K-\cos\theta_j^H)\right]+ \qquad (11)$$
$$+q_j r(1-\cos\theta\cos\theta_j^K-\sin\theta\sin\theta_j^K).$$

Подставив выражения (2), (6)–(11) в (5) и проинтегрировав по участкам непрерывности эпюр, получим грузовое перемещение, которое состоит из трёх слагаемых, учитывающих соответственно три вида внутренних сил в арках – усилий M, Q и N:

$$\Delta_{ip}=\Delta_{ip}^M+\Delta_{ip}^Q+\Delta_{ip}^N,$$

где в свою очередь: $\Delta_{ip}^M=\Delta_{ip}^{MП}+\Delta_{ip}^{MЛ}$, $\Delta_{ip}^Q=\Delta_{ip}^{QП}+\Delta_{ip}^{QЛ}$, $\Delta_{ip}^N=\Delta_{ip}^{NП}+\Delta_{ip}^{NЛ}$.

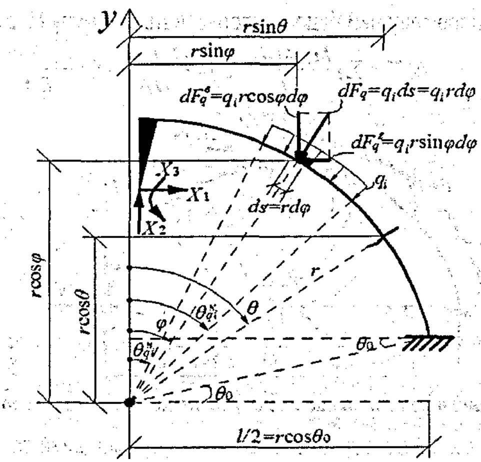
Представим только слагаемые для определения грузовых перемещений от действия единичной силы X_1 и момента, вызванного действием радиально направленной равномерно распределённой нагрузки:

$$\Delta_{1p}^M=\frac{r^3}{EI}\sum_{i=1}^{n_q^П} q_i\Big\{(c-r)(\theta_i^K-\theta_i^H)+(c-r)\sin\theta_i^H(\cos\theta_i^K-\cos\theta_i^H)-(c-r)\cos\theta_i^H(\sin\theta_i^K-\sin\theta_i^H)+$$
$$+r(\sin\theta_i^K-\sin\theta_i^H)-\frac{1}{2}r\sin\theta_i^H(\sin^2\theta_i^K-\sin^2\theta_i^H)-\frac{1}{2}r\cos\theta_i^H(\theta_i^K-\theta_i^H)-$$
$$-\frac{1}{4}r\cos\theta_i^H(\sin 2\theta_i^K-\sin 2\theta_i^H)\Big\}+\frac{r^3}{EI}\sum_{i=1}^{n_q^П} q_i\Big\{(c-r)(\sin\theta_i^K-\sin\theta_i^H)(\cos\theta_i^K-\sin\theta_0)+$$
$$+(c-r)(\cos\theta_i^K-\cos\theta_i^H)(\cos\theta_0-\cos\theta_i^K)+\frac{r}{2}(\sin\theta_i^K-\sin\theta_i^H)(\cos^2\theta_0-\sin^2\theta_i^K)+$$
$$+\frac{r}{2}(\cos\theta_i^K-\cos\theta_i^H)\left[\left(\frac{\pi}{2}-\theta_0-\theta_i^K\right)+\frac{1}{2}(\sin 2\theta_0-\sin 2\theta_i^K)\right]\Big\}+\frac{r^3}{EI}\sum_{j=1}^{n_q^Л} q_j\Big\{(c-r)(\theta_j^K-\theta_j^H)+$$
$$+(c-r)\sin\theta_j^K(\cos\theta_j^K-\cos\theta_j^H)-(c-r)\cos\theta_j^K(\sin\theta_j^K-\sin\theta_j^H)+r(\sin\theta_j^K-\sin\theta_j^H)-$$
$$-\frac{1}{2}r\sin\theta_j^K(\sin^2\theta_j^K-\sin^2\theta_j^H)-\frac{1}{2}r\cos\theta_j^K(\theta_j^K-\theta_j^H)-\frac{1}{4}r\cos\theta_j^K(\sin 2\theta_j^K-\sin 2\theta_j^H)\Big\}-$$
$$-\frac{r^3}{EI}\sum_{j=1}^{n_q^Л} q_j\Big\{(c-r)(\sin\theta_j^K-\sin\theta_j^H)(\sin\theta_0-\cos\theta_j^H)+(c-r)(\cos\theta_j^K-\cos\theta_j^H)(\cos\theta_0+\sin\theta_j^H)+$$
$$+\frac{r}{2}(\sin\theta_j^K-\sin\theta_j^H)(\sin^2\theta_j^H-\cos^2\theta_0)+\frac{r}{2}(\cos\theta_j^K-\cos\theta_j^H)\left[\left(\frac{\pi}{2}-\theta_0+\theta_j^H\right)+\frac{1}{2}(\sin 2\theta_0+\sin 2\theta_j^H)\right]\Big\}.$$

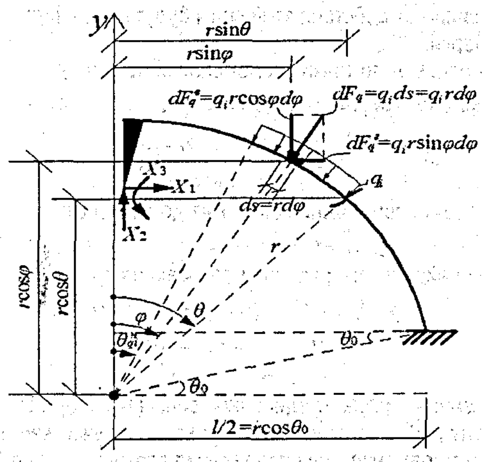
Далее можно решить систему канонических уравнений метода сил (1) и найти неизвестные X_1, X_2, X_3. Окончательные значения внутренних усилий в сечениях правых / левых частей рассматриваемых арок определяются по выражениям:

$$M=\overline{M}_1X_1+\overline{M}_2X_2+\overline{M}_3X_3+M_p^{П/Л};$$

$$Q=\overline{Q}_1X_1+\overline{Q}_2X_2+\overline{Q}_3X_3+Q_p^{П/Л};\qquad N=\overline{N}_1X_1+\overline{N}_2X_2+\overline{N}_3X_3+N_p^{П/Л}.$$



а) сечение на участке, свободном от нагрузки



б) сечение на участке распределённой нагрузки

Рисунок 3 – Отсечение части арки

Определение вертикальных перемещений точек. Деформированный вид арок будет определён, если будут известны перемещения каждой из точек, лежащих на оси арки. Перемещения этих точек будут в общем случае происходить в произвольных направлениях, поэтому для их нахождения (и нахождения соответственно новых координат положения точек) необходимо определить отдельно составляющие этих перемещений на оси *x* и *y* – Δ_x и Δ_y. Результирующее значение перемещения и его направление тогда можно будет найти по выражениям:

$$\Delta = \sqrt{(\Delta_x)^2 + (\Delta_y)^2}; \qquad tg\,\varphi = \Delta_x / \Delta_y. \qquad (12)$$

Для определения перемещений будем использовать формулу Мора:

$$\Delta_{ip}^{верт} = \sum\int \frac{\overline{M_i}\cdot M\,ds}{EJ} + \sum\int J\frac{\overline{Q_i}\cdot Q\,ds}{GA} + \sum\int \frac{\overline{N_i}\cdot N\,ds}{EA}. \tag{13}$$

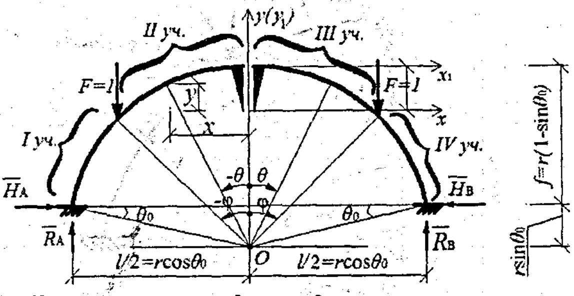


Рисунок 4 – Единичное состояние для определения вертикального перемещения

Получим вначале выражения для вертикальных перемещений точек, лежащих на оси арки. Для этого в принятой статически определимой системе (рис. 2) приложим в точке, для которой будем определять перемещение, единичную вертикальную силу (рис. 4).

Выражения для усилий от действия этой силы будут иметь вид:

1. Для левой полуарки:

а) на участке I (от опоры А до точки приложения силы F = 1):

$$\overline{M}_i^{I} = -\left(R_A\cdot(r\cdot\cos\theta_0 + x) - M_A\right) = -\left(r\cdot\cos\theta_0 + r\cdot\sin\theta - r\cdot\cos\theta_0 - r\cdot\sin\varphi\right) = -r\cdot\left(\sin\theta - \sin\varphi\right);$$

$$\overline{Q}_i^{I} = +R_A\cdot\cos(-\theta) = \cos\theta; \tag{14}$$

$$\overline{N}_i^{I} = -R_A\cdot\sin(-\theta) = \sin\theta;$$

а) на участке II (от точки приложения силы F=1 до опоры В):

$$\overline{M}_i^{II} = 0;\quad \overline{Q}_i^{II} = 0;\quad \overline{N}_i^{II} = 0, \tag{15}$$

где опорные реакции найдены из уравнений равновесия арки:

$$\sum M_A = 0:\quad 1\cdot r\cdot\left(\cos\theta_0 - \sin(-\varphi)\right) - M_A = 0.$$

$$M_A = r\cdot\left(\cos\theta_0 + \sin\varphi\right). \tag{16}$$

$$\sum Y = 0:\quad R_A = 1.$$

Подставив выраженния усилий от единичной силы (14), (15) и от внешних нагрузок (7), (9), (11) в формулу (13), выполнив интегрирование по участкам и просуммировав его результаты, получим выражение для определения вертикального перемещения рассматриваемой точки (сечения) левой полуарки, которое представим в виде:

$$\Delta_y^{лев} = \left(\Delta_{yX_1}^{(M)} + \Delta_{yX_1}^{(Q)} + \Delta_{yX_1}^{(N)}\right)\cdot X_1 + \left(\Delta_{yX_2}^{(M)} + \Delta_{yX_2}^{(Q)} + \Delta_{yX_2}^{(N)}\right)\cdot X_2 + \tag{17}$$
$$+\left(\Delta_{yX_3}^{(M)} + \Delta_{yX_3}^{(Q)} + \Delta_{yX_3}^{(N)}\right)\cdot X_3 + \Delta_{yp}^{(M)лев} + \Delta_{yp}^{(Q)лев} + \Delta_{yp}^{(N)лев},$$

где $\Delta_{yX_1}^{(M)}, \Delta_{yX_1}^{(Q)}, \Delta_{yX_1}^{(N)}; \Delta_{yX_2}^{(M)}; \Delta_{yX_2}^{(Q)}, \Delta_{yX_2}^{(N)}; \Delta_{yX_3}^{(M)}, \Delta_{yX_3}^{(Q)}, \Delta_{yX_3}^{(N)}$ – перемещения искомой точки в вертикальном направлении (по оси y) в основной системе метода сил от действия единичных значений неизвестных метода сил соответственно X_1, X_2, X_3, определяемые выражениями:

$$\Delta_{yX_1}^{(M)} = -\frac{r^3}{EJ}\left[\left(\cos\theta_0\Big/\left(\frac{\pi}{2}-\theta_0\right)\right)\cdot\left(\cos\varphi + \sin\theta_0 + \sin\varphi\cdot\varphi + \sin\varphi\cdot\left(\frac{\pi}{2}-\theta_0\right)\right) -\right.$$
$$\left. -\frac{1}{4}\cos 2\varphi - \frac{1}{4}\cos 2\theta_0 - \sin^2\varphi - \sin\varphi\cdot\cos\theta_0\right]; \tag{18}$$

$$\Delta_{yX_1}^{(Q)} = \eta\frac{r}{GA}\cdot\frac{1}{2}(\sin^2\varphi - \cos^2\theta_0);\quad \Delta_{yX_1}^{(N)} = \frac{r}{EA}\cdot\frac{1}{2}\cdot\left(\cos^2\theta_0 - \sin^2\varphi\right);$$

$$\Delta_{yX_2}^{(M)} = -\frac{r^3}{EJ}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2}+\varphi-\theta_0\right)-\frac{1}{4}\sin 2\varphi-\frac{1}{4}\sin 2\theta_0+\sin\varphi\cos\varphi+\sin\varphi\sin\theta_0\right];$$

$$\Delta_{yX_2}^{(Q)} = -\eta\frac{r}{GA}\cdot\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2}+\varphi-\theta_0\right)+\frac{1}{4}\left(\sin 2\varphi+\sin 2\theta_0\right)\right]; \tag{19}$$

$$\Delta_{yX_2}^{(N)} = -\frac{r}{EA}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2}+\varphi-\theta_0\right)-\frac{1}{4}\left(\sin 2\varphi+\sin 2\theta_0\right)\right];$$

$$\Delta_{yX_3}^{(M)} = -\frac{r^3}{EJ}\cdot\left[-\cos\varphi+\sin\theta_0-\sin\varphi\cdot\left(\frac{\pi}{2}+\varphi-\theta_0\right)\right];\quad \Delta_{yX_3}^{(Q)} = 0;\quad \Delta_{yX_3}^{(N)} = 0. \tag{20}$$

$\Delta_{yp}^{(M)\text{лев}}, \Delta_{yp}^{(Q)\text{лев}}, \Delta_{yp}^{(N)\text{лев}}$ – перемещения рассматриваемой точки в вертикальном направлении (по оси y) в основной системе метода сил от действия внешних нагрузок, определяемые выражениями.

Приведём только выражение для определения $\Delta_{yp}^{(M)\text{лев}}$:

$$\begin{aligned}
\Delta_{yp}^{(M)\text{лев}} &= \frac{r^4}{EJ}\sum_{j1=1}^{n_q^{\text{лев}}} q_{j1}\Bigg\{\left(\sin\theta_{j1}^{\kappa}-\sin\theta_{j1}^{н}\right)\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2}+\varphi-\theta_0\right)-\frac{1}{4}\sin^2\varphi-\frac{1}{4}\sin 2\theta_0+\sin\varphi\cos\varphi-\sin\varphi\sin\theta_0\right]+\\
&+\left(\cos\theta_{j1}^{\kappa}-\cos\theta_{j1}^{н}\right)\cdot\left[\sin^2\varphi-\frac{1}{2}\cos^2\theta_0-\sin^2\varphi-\sin\varphi\times\cos\theta_0\right]\Bigg\}+\frac{r^4}{EJ}\sum_{j2=1}^{n_q^{\text{лев}}} q_{j2}\cdot\Big\{\sin\varphi\left(\theta_{j2}^{\kappa}-\theta_{j2}^{н}\right)+\\
&+\cos\theta_{j2}^{\kappa}-\cos\theta_{j2}^{н}+\sin\varphi\cdot\sin\theta_{j2}^{\kappa}\cdot\left(\cos\theta_{j2}^{\kappa}-\cos\theta_{j2}^{н}\right)+\sin\theta_{j2}^{\kappa}\cdot\left(\frac{1}{2}\left(\theta_{j2}^{\kappa}-\theta_{j2}^{н}\right)-\frac{1}{4}\sin 2\theta_{j2}^{\kappa}+\frac{1}{2}\sin 2\theta_{j2}^{н}\right)-\\
&-\sin\varphi\cdot\cos\theta_{j2}^{\kappa}\cdot\left(\sin\theta_{j2}^{\kappa}-\sin\theta_{j2}^{н}\right)+\cos\theta_{j2}^{\kappa}\cdot\left(\frac{1}{2}\sin^2\theta_{j2}^{\kappa}-\frac{1}{2}\sin^2\theta_{j2}^{н}\right)+\left(\sin\theta_{j2}^{\kappa}-\sin\theta_{j2}^{н}\right)\cdot\Bigg[\frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2}+\theta_{j2}^{н}-\theta_0\right)-\\
&-\frac{1}{4}\sin 2\theta_{j2}^{н}-\frac{1}{4}\sin 2\theta_0+\sin\varphi\cdot\left(\cos\theta_{j2}^{н}-\sin\theta_0\right)\Bigg]+\left(\cos\theta_{j2}^{\kappa}-\cos\theta_{j2}^{н}\right)\cdot\Bigg[\frac{1}{2}\sin^2\theta_{j2}^{н}-\frac{1}{2}\cos^2\theta_0-\\
&-\sin\varphi\cdot\left(\sin\theta_{j2}^{н}+\cos\theta_0\right)\Bigg]\Big\}+\frac{r^4}{EJ}q_m\cdot\Big\{\sin\varphi\cdot\left(\varphi-\theta_{j3}^{н}\right)+\cos\varphi-\cos\theta_{j3}^{н}+\sin\varphi\cdot\sin\theta_{j3}^{\kappa}\cdot\left(\cos\varphi-\cos\theta_{j3}^{\kappa}\right)+\\
&+\sin\theta_{j3}^{\kappa}\cdot\left(\frac{1}{2}\cdot\left(\varphi-\theta_{j3}^{н}\right)-\frac{1}{4}\sin 2\varphi+\frac{1}{4}\sin 2\theta_{j3}^{н}\right)-\sin\varphi\cos\theta_{j3}^{\kappa}\cdot\left(\sin\varphi-\sin\theta_{j3}^{н}\right)+\cos\theta_{j3}^{\kappa}\cdot\left(\frac{1}{2}\sin^2\varphi-\frac{1}{2}\sin^2\theta_{j3}^{н}\right)+\\
&+\left(\sin\theta_{j3}^{\kappa}-\sin\theta_{j3}^{н}\right)\times\left[\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\pi}{2}+\theta_{j3}^{н}-\theta_0\right)-\frac{1}{4}\sin 2\theta_{j3}^{н}-\frac{1}{4}\sin 2\theta_0+\sin\varphi\cdot\left(\cos\theta_{j3}^{н}-\sin\theta_0\right)\right]+\\
&+\left(\cos\theta_{j3}^{\kappa}-\cos\theta_{j3}^{н}\right)\cdot\left[\frac{1}{2}\sin^2\theta_{j3}^{н}-\frac{1}{2}\cos^2\theta_0-\sin\varphi\cdot\left(\sin\theta_{j3}^{н}+\cos\theta_0\right)\right]\Big\}
\end{aligned} \tag{21}$$

Заключение. Разработана в замкнутом виде методика расчёта бесшарнирных арок постоянной жёсткости кругового очертания при статическом действии радиально направленных равномерно распределённых ветровых нагрузок. Методика реализована в программе, составленной в среде MathCad.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07–85 / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.
2. Строительная механика: учебное пособие / А.А. Борисевич, Е.М. Сидорович, В.И. Игнатюк. – Мн.: БНТУ, 2009. – 756 с.
3. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчётно-теоретический: в 2 кн. / Под ред. А.А. Уманского. – М.: Стройиздат, 1972. – Кн. 2. – 600 с.