

УДК 624.01

## ЖЕСТКОСТЬ УПРУГО-ПОДАТЛИВЫХ ОПОР МАЧТОВЫХ СИСТЕМ

*к.т.н., доц., Яровой Ю.Н., аспирант Левада В.А.*

*Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры*

Мачтовая система представляет собой упругую систему, которая состоит из вертикального стержня (ствола мачты), опертого нижним концом на фундамент, раскрепленного в различных уровнях по высоте некоторым числом гибких нитей (оттяжек). Оттяжки закреплены на нижнем конце к анкерным фундаментам. Расчетной схемой мачты на оттяжках является сжатый или сжато-изогнутый стержень на упруго-податливых опорах. Жесткости опор определяют устойчивость стержня. Каждая упругая опора мачты представляет собой некоторое число гибких пологих нитей (оттяжек), прикрепленный к ее стволу в одном уровне.

Мачтовая система воспринимает внешние нагрузки, вызванные различными факторами: ветром, перепадам температуры, появлением гололеда и т. д. При этом усилия, как в стволе, так и в оттяжках мачты могут изменяться в широких пределах.

Изменение распора каждой гибкой нити (из числа нитей, образующих упругую систему) при том, или ином загрузении мачтовой системы приводит к изменению жесткости этой упругой опоры. Жесткость одной и той же упругой опоры оказывается неодинаковой по различным горизонтальным направлениям.

Приближенные методы расчета гибких нитей содержат ряд допущений и требуют классификации гибкой нити по геометрической схеме. Целью данной работы является обоснование метода расчета гибкой нити (оттяжки), который позволит достаточно полно учесть параметры гибкой нити и выполнить расчеты по приближенным формулам.

В качестве примера рассмотрим пологую нить, закрепленную в разных уровнях (рис.1).

$$\begin{aligned} L &= 40i \text{ .;} \\ \dot{i} &= 60i \text{ .;} \\ q &= 1.5кг / м ; \end{aligned}$$

Начальное натяжение в точке А:  $T_A = 150кг.$

Начальная форма провисания гибкой нити определяется уравнением цепной линии, параметрами которой являются собственный вес и горизонтальная составляющая усилия натяжения:

$$y = \frac{T_A \dot{i}}{2 \cdot q} \left( e^{\frac{(x+C^*) \cdot q}{T_A}} - e^{-\frac{(x+C^*) \cdot q}{T_A}} \right) - C^{**}, \quad (1)$$

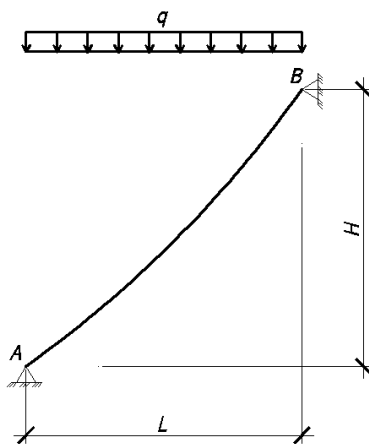


Рис.1. Расчетная схема.

где  $y, x$  – координаты кривой провисания нити;

$T_A$  – начальное натяжение в точке А;

$q$  – погонная нагрузка собственного веса нити;

$e$  – основание натурального логарифма;

$C^*, C^{**}$  – константы интегрирования, определяемые из начальных условий.

Используя начальные условия  $y(x = 0) = 0, y(x = L) = H$

Из совместного решения двух уравнений (1) получены значения произвольных постоянных  $C^* = 75.35, C^{**} = 82.68$

Длина кривой провисания вычислена по формуле:

$$S = \int_0^x \sqrt{\left(1 + \left(\frac{d}{dx} \left( \frac{T_A}{2 \cdot q} \cdot \left( e^{\frac{(x+C^*)q}{T_A}} - e^{-\frac{(x+C^*)q}{T_A}} \right) - C^{**} \right) \right)^2\right)} dx, \quad (2)$$

а ее численное значение составило  $S = 72.17 \text{ м}$ .

Расчет длины провисания гибкой нити по формулам (1), (2) требует определения констант интегрирования из совместного решения уравнений, что несколько громоздко.

Также выполнен расчет по приближенным формулам.

Определим распор:

$$H^A = \left( T_A + \frac{q \cdot L \cdot \sin \alpha}{2} - \frac{q^2 \cdot L^2 \cdot \cos^2 \alpha}{8 \cdot T_A} \right) \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

Для исходных данных, вычислено значение распора  $H = 96.54\text{ê}\tilde{\alpha}$   
 Длина нити вычислена по формуле:

$$S = \frac{L}{\cos \alpha} + \frac{q^2 \cdot L^3 \cdot \cos^3 \alpha}{24 \cdot H^A} \quad (4)$$

, а ее численное значение составило  $S = 72.22\tilde{i}$ .

Также проведен ряд расчетов для других исходных данных. Результаты вычислений приведены в таблице 1. Расчет по приближенным формулам менее трудоемок, погрешность расчетов минимальна.

Таблица 1

Проекция на ось x L, м	Проекция на ось y H, м	Нагрузка q, кг/м	Усилие натяжения T <sub>A</sub> , кг	Длина нити по формуле (2) Сточн, м	Длина нити по формуле (4) Сприбл,	Погрешность %
10	15	0.5	50	18.07	18.03	0.2
20	30	1	100	36.11	36.07	0.1
40	60	1.5	150	72.17	72.22	0.1
60	90	2	200	108.40	108.49	0.1
80	120	2.5	250	144.69	144.91	0.15
100	150	3	300	181.12	181.50	0.2

Сравнивая полученные результаты, очевидно, что значения длины нити рассчитанной по формулам (2) и (4) дают близкие значения, погрешность составляет не более 0.2%. В ходе дальнейших вычислений, для определения длины нити рационально использовать формулы (3), (4).

В случае линейной зависимости между смещением и реакцией упруго-податливой опоры коэффициент жесткости опоры величина постоянная. Этот коэффициент жесткости определяется величиной реакции, возникающей в упругой опоре при ее единичном смещении. Однако, как показали исследования реакция упруго-податливой опоры и ее смещение связаны нелинейной зависимостью. Начальная жесткость  $\zeta$  нелинейной упруго-податливой опоры, образованной гибкими нитями, равна сумме начальных сопротивлений смещению общей точки закрепления всех нитей, образующих эту опору.

Величина начальной жесткости упруго-податливой опоры, соответствующая монтажному положению мачтовой системы одинакова во всех направлениях и вычисляется по формуле:

$$\xi_0 = \beta_0 \cdot \frac{n}{2}, \quad (5)$$

, где:

$n$  – количество оттяжек

Начальное сопротивление нити:

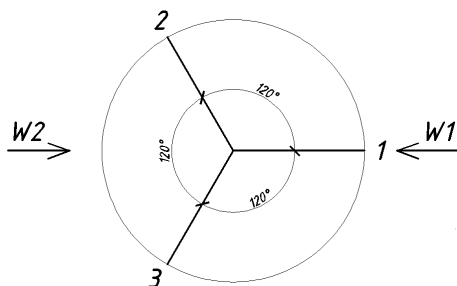
$$\beta_0 = \frac{1}{\frac{2 \cdot l^3 \cdot G_0 \cdot \cos^2 \alpha}{H_0^3} + \frac{1}{E \cdot A \cdot \cos^2 \alpha}}; \quad (6)$$

График начальной жесткости  $\xi_0$  в полярных координатах представляет собой окружность.

В ходе эксплуатации мачтовая система подвергается значительным воздействиям ветровой нагрузки. Направление ветровой нагрузки может быть произвольным. В данной работе представлен случай, когда направление ветрового потока параллельно плоскости симметрии оттяжек.

Рассмотрим наиболее распространенные в инженерной практике упругие опоры, образованные тремя оттяжками.

Начальная жесткость опоры образованной тремя оттяжками, соответствующая монтажному положению мачтовой системы вычисляется по формуле:



$$\xi_0 = \beta_0 \cdot \frac{3}{2}. \quad (7)$$

При воздействии ветровой нагрузки  $W_1$  (рис. 1а) начальная жесткость опоры вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} \xi_{1,max} &= \beta_{11} \cdot \cos^2 0^0 + \beta_{12} \cdot \cos^2 120^0 + \beta_{13} \cdot \cos^2 240^0; \\ \xi_{1,min} &= \beta_{11} \cdot \cos^2 90^0 + \beta_{12} \cdot \cos^2 210^0 + \beta_{13} \cdot \cos^2 330^0; \end{aligned} \quad (8)$$

Рис.2. Мачтовая система из 3-х оттяжек.

Исходя из того, что  $\beta_{12} = \beta_{13}$  :

$$\xi_{1,max} = \beta_{11} + \frac{1}{2} \cdot \beta_{12}; \quad (9)$$

$$\xi_{1,min} = \frac{3}{2} \cdot \beta_{12}. \quad (10)$$

$\xi_{1,max}$  – начальная жесткость опоры, соответствующая направлению ветрового потока;

$\xi_{1,min}$  – начальная жесткость опоры, соответствующая направлению перпендикулярному ветровому потоку.

При воздействии ветровой нагрузки W2 начальная жесткость опоры вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} \xi_{1,max} &= \frac{3}{2} \cdot \beta_{12} \\ \xi_{1,min} &= \beta_{11} + \frac{1}{2} \cdot \beta_{12} \end{aligned} \quad (11)$$

Следует отметить, что  $\xi_{1,min}$  может оказаться меньше  $\xi_0$ , а  $\xi_{1,max}$  при любом направлении ветра всегда больше  $\xi_0$ .

В ходе эксплуатации мачтовая система также подвергается температурному воздействию, смещению опор, влиянию гололеда и т.д. Это послужит темой дальнейших публикаций.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко Устойчивость мачт на оттяжках. М.:Стройиздат, 1964. – 112 с.
2. Яровой Ю.Н., Мозговой А.А., Донцов А.И., Яровой С.Н., Попов В.В. Постановка задачи оценки напряженно-деформированного состояния металлических дымовых труб с оттяжками / Новини науки Придніпров'я. Вип.4.-ПДАБА, 2004. – С. 91-94
3. Савицкий Г. А. Основы расчета радиомачт. М.:Связьиздат, 1953. – 275с.
4. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. – 241с.