

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗГИБА БАШЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Под влиянием неравномерного солнечного нагрева непрерывно происходит изгиб сооружения. Положение любой точки сооружения можно вычислить по формулам

$$\begin{aligned}x_i &= S_i \cos A_i, \\y_i &= S_i \sin A_i,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $S_i$  — смещение точки от теоретического положения,  $A_i$  — азимут направления смещения точки.

Теоретическое значение смещения  $S$  точек сооружения под действием температурной разности  $\Delta t$  можно подсчитать по формуле [2]

$$S = \frac{\alpha_t \Delta t H^2}{2D}, \quad (2)$$

где  $\alpha_t$  — коэффициент линейного расширения;  $H$  — текущая высота точки;  $D$  — средний диаметр ствола башни.

Тепловое воздействие на сооружение происходит под влиянием температуры внешней среды и за счет суммарного действия прямой и рассеянной радиации. Согласно [2], вычисляем суммарную температуру на наружной поверхности конструкции:

$$t_{\text{сум}} = t_{\text{н}} + \frac{PI}{\alpha_{\text{н}}}, \quad (3)$$

где  $t_{\text{н}}$  — температура наружного воздуха;  $\alpha_{\text{н}}$  — коэффициент теплообмена между наружной поверхностью сооружения и наружным воздухом;  $P$  — коэффициент поглощения солнечной радиации наружной поверхностью сооружения.

Колебания температуры, происходящие на поверхности, распространяются вглубь конструкции и постепенно затухают в ее толще.

Формулу для подсчета температурной разности  $\Delta t$ , возникающей в стенках конструкции между двумя диаметрально противоположными точками, можно получить на основании (3):

$$\Delta t = c \frac{P}{\alpha_{\text{н}}} (I_1 - I_2), \quad (4)$$

где  $c$  — коэффициент, учитывающий затухание температуры в конструкции сооружения;  $I_1$  и  $I_2$  — количество суммарной солнечной радиации, поступающей на диаметрально противоположные точки сооружения.

С учетом (2) и (4) формулы для вычисления координат примут вид

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{\alpha_t H^2}{2D} c \frac{P}{\alpha_n} (I_1 - I_2)_i \cos A_i, \\ y_i &= \frac{\alpha_t H^2}{2D} c \frac{P}{\alpha_n} (I_1 - I_2)_i \sin A_i. \end{aligned} \quad (5)$$

Направление изгиба сооружения не совпадает с направлением падающих на башню солнечных лучей из-за инерции распространения температуры в конструкции, поэтому для общего случая азимут изгиба оси сооружения можно выразить формулой

$$A = A_c + 180^\circ - \beta, \quad (6)$$

где  $A_c$  — азимут Солнца;  $\beta$  — угол запаздывания изгиба оси сооружения, являющийся функцией времени  $\beta = f(t)$ .

Подставив значение  $A$  из (6) в (5) и выполнив преобразования, получим

$$\begin{aligned} x_i &= -\frac{\alpha_t H^2 c P}{2D \alpha_n} [(I_1 - I_2)_i (\cos A_c)_i \cos \beta_i + (I_1 - I_2)_i (\sin A_c)_i \sin \beta_i], \\ y_i &= \frac{\alpha_t H^2 c P}{2D \alpha_n} [(I_1 - I_2)_i (\cos A_c)_i \sin \beta_i - (I_1 - I_2)_i (\sin A_c)_i (\cos \beta_i)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Принимая во внимание то, что ось  $x$  совмещена с направлением север—юг, а ось  $y$  — с направлением восток—запад, формулы (7) для вычисления координат точек сооружения, перемещающихся под действием солнечной радиации на любой момент, примут вид

$$\begin{aligned} x_i &= -\frac{\alpha_t H^2 c P}{2D \alpha_n} (\delta I_{1i} \cos \beta_i + \delta I_{2i} \sin \beta_i), \\ y_i &= \frac{\alpha_t H^2 c P}{2D \alpha_n} (\delta I_{1i} \sin \beta_i - \delta I_{2i} \cos \beta_i), \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\delta I_1 = (I_1 - I_2) \cos A_c = I_c - I_{ю}; \quad \delta I_2 = (I_1 - I_2) \sin A_c = I_в - I_з;$$

$I_c, I_{ю}, I_в, I_з$  — количество суммарной радиации, поступающей на стенки конструкции с севера, юга, востока, запада.

Эти величины можно выбрать из таблиц [1]. Угол запаздывания  $\beta$  изгиба оси сооружения от направления солнечных лучей можно вычислить по формуле

$$\beta_i = k(t_i - t_{нач}), \quad (9)$$

где  $k$  — коэффициент запаздывания;  $t_i$  — текущее время наблюдений;  $t_{нач}$  — начальное время.

Очевидно, что в ясную безоблачную погоду сооружение не может отклоняться в направлении Солнца, т. е. угол запаздывания  $\beta$  теоретически может быть в пределах от 0 до  $180^\circ$ .

Для широты Москвы в летнее время период действия солнечной радиации составляет 16ч. По формуле (9) можно вычислить максимальный коэффициент запаздывания ( $k=11^\circ$ ), т. е. коэффициент  $k$  будет в пределах от 0 до  $11^\circ$ .

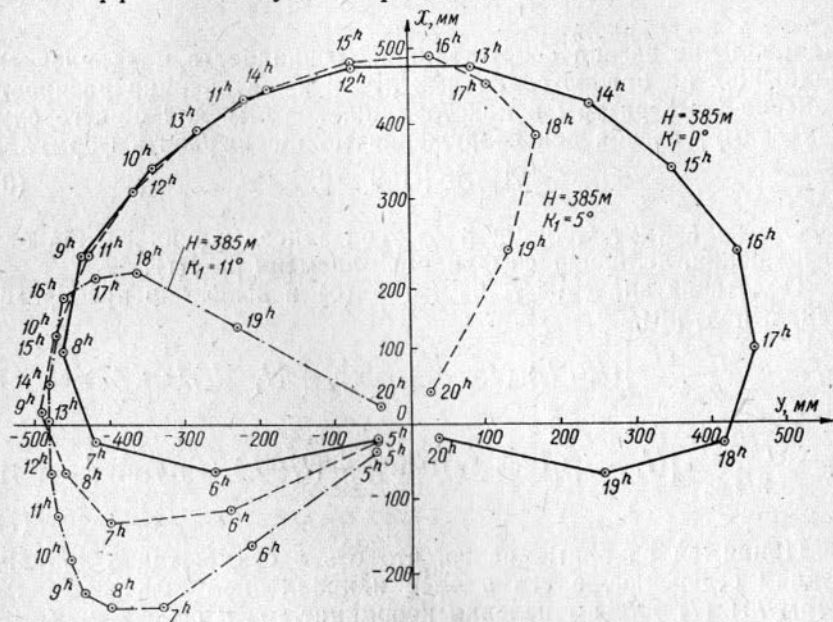


График изгиба сооружения.

Угол  $\beta$  зависит от тепловой инерционности сооружения и может быть определен для конкретных сооружений и различных высот эмпирически по результатам наблюдений. Например, для высот 300 и 520 м Останкинской телебашни для углов запаздывания получены выражения

$$\begin{aligned} \beta_{i(n=300)} &= 10,0^\circ (t_i^h - 8^h), \\ \beta_{i(n=520)} &= 4,5^\circ (t_i^h - 7^h). \end{aligned} \quad (10)$$

Из формул видно, что в 7—8 ч утра направление изгиба оси ствола башни совпадает с направлением солнечных лучей. После 8 ч наблюдается отставание изгиба оси ствола башни от движения Солнца и к 18 ч оно составляет для точек, расположенных на высоте 300 и 520 м, соответственно 100 и  $50^\circ$ .

Используя (8), на процессоре «Искра-1256» составлена программа для вычисления текущих координат  $x$  и  $y$ . Задаваясь значениями параметров, входящих в формулы, на примере Останкинской телебашни нашли значения  $x$  и  $y$  для коэффициентов  $k$  от 0 до  $11^\circ$  с интервалом через  $1^\circ$ .

На рисунке показаны графики изгиба Останкинской телебашни для высоты 385 м для трех значений коэффициента  $k$ : 1) когда изгиб сооружения происходит по направлению солнечных лучей ( $k=0^\circ$ ); 2) при среднем значении коэффициента  $k=5^\circ$ ; 3) при максимальном коэффициенте запаздывания  $k=11^\circ$ .

При  $k=0^\circ$  точки оси башни описывают приближенно эллипс, большая ось которого устанавливается по направлению запад-восток. При увеличении коэффициентов запаздывания точки оси сооружения будут описывать кривые, расположенные к северо-западу от центра.

Зная параметры, характеризующие конструктивные особенности данного сооружения, а также величины солнечной радиации, можно составить таблицы возможных отклонений и графики изгибов точек оси сооружения до начала строительства.

Из анализа величин этой таблицы и графиков изгибов можно выбрать необходимый метод проектирования центра на монтажный горизонт. При строительстве сооружения, определив фактические размеры изгибов и их направления для каких-то высот, можно сравнить их с теоретическими величинами и внести необходимые коррективы в методику выноса центра на последующие монтажные горизонты при воздействии солнечной радиации на сооружение.

1. Круглова А. И. Климат и ограждающие конструкции. М., 1970.
2. Шкловер А. М. Основы строительной теплотехники. М., 1956.