

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МАКСИМАЛЬНОГО УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТЕ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕВРОКОДА

В данной статье рассматриваются вопросы определения максимального усилия в элементе конструкции высотных сооружений (башен и мачт) с использованием Еврокода [1–3]. И сразу же отметим, что максимальные величины усилия S_{\max} в элементе конструкции или действующей силы на фундаменты устанавливаются с использованием определенных на основе средней ветровой нагрузки $F_{m,W}$ значений этих параметров $S_{m,W}$ при направлении ветра на башню, а также с учетом коэффициента увеличения. Следовательно, имеем:

$$S_{\max} = S_{m,W} \left\{ 1 + \left(1 + 0,2 \left(\frac{z_m}{h} \right)^2 \right) \frac{[1 + 7I_v(z_e)]c_s c_d - 1}{c_0(z_m)} \right\},$$

где I_v – интенсивность турбулентности; $c_s c_d$ – конструктивный коэффициент; c_0 – коэффициент рельефа; z_e – базовая высота; z_m – высота элемента над землей; h – высота башни.

Что же касается величины нагрузок, используемых для расчета связевых конструктивных элементов, то Еврокод [1, 2] связывает их с конфигурацией башни. К примеру, при наклоне поясов таким образом, что их проекции пересекаются над вершиной башни, усилия в связях или усилие сдвига над заданным уровнем башни определяются в соответствии с вышеприведенной формулой для S_{\max} (рис. 1, а, б). А для башен с поясами, проекции которых пересекаются ниже вершины башни, уже необходимо выполнять два расчета: с учетом средней ветровой нагрузки $F_{m,W}(z)$ под сечением и эквивалентной ветровой нагрузки при порывах ветра $F_{T,W}(z)$ над сечением, а также средней ветровой нагрузки $F_{m,W}(z)$ над сечением и эквивалентной ветровой нагрузки при порывах ветра $F_{T,W}(z)$ под сечением (рис. 1, в, г). Если же таких сечений в башне насчитывается несколько, то для каждой панели необходимо также выполнять эти два расчета (рис. 1, д, е).

Следует отметить, что максимальные усилия в мачтах находятся с учетом атмосферной турбулентности от действия результирующей эквивалентной статической нагрузки от среднего



А.В. Шимановский
генеральный директор
ООО «Укринсталкон
им. В.Н. Шимановского»,
член-корреспондент НАН Украины,
заслуженный деятель науки и техники
Украины, д.т.н., профессор



С.М. Кондра
главный конструктор отдела
пространственных сооружений
ООО «Укринсталкон
им. В.Н. Шимановского»

ветра при десятиминутном интервале осреднения его скоростного напора и переменной нагрузки от пульсаций. Также стоит подчеркнуть, что при определении усилий в элементах мачты обычно используются статические методы, а метод динамических характеристик применяется для мачт, склонных к сильной реакции на динамические воздействия.

По существу же рассматриваемого вопроса укажем, что при использовании статических методов должны выполняться следующие два условия:

1. Длина консоли над верхней оттяжкой должна быть вдвое меньше половины расстояния между предпоследним и последним ярусом оттяжек, причем величина параметра β_s должна удовлетворять неравенству

$$\beta_s = 4 \left(\frac{E_m I_m}{L_s^2} \right) / \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{G_i} H_{G_i} \right) < 1,$$

при $K_{G_i} = \frac{1}{2} N_i A_{G_i} E_{G_i} \cos^2 \alpha_{G_i} / L_{G_i}$,

где N – количество ярусов оттяжек; A_{G_i} – площадь поперечного сечения оттяжки в i -м ярусе крепления; E_{G_i} – модуль осевой упругости оттяжки в i -м ярусе крепления; L_{G_i} – длина оттяжки в i -м ярусе крепления; N_i – количество оттяжек, закрепленных в i -м ярусе крепления;

H_{G_i} – высота i -го яруса крепления над основанием мачты; α_{G_i} – наклон оттяжки к горизонтали в i -м ярусе крепления; E_m – модуль упругости мачты; I_m – средний момент инерции мачты при изгибе; L_s – среднее расстояние между ярусами креплений оттяжек.

2. Значение параметра Q должно удовлетворять неравенству

$$Q = \frac{1}{30} \sqrt[3]{\frac{HV_H}{D_0}} \sqrt{\frac{m_0}{HR}} < 1,$$

где m_0 – средняя масса на единицу длины ствола мачты, включая вспомогательные устройства; D_0 – средняя ширина грани мачты; V_H – средняя скорость ветра на вершине мачты; R – среднее аэродинамическое сопротивление; H – высота мачты, включая консоль при ее наличии.

А теперь перейдем к установлению ветровых нагрузок. Итак, средняя ветровая нагрузка при направлении ветра на мачту $F_{m,w}$ вычисляется по формуле

$$F_{m,w}(z) = \frac{q_p(z)}{1 + 7I_v(z)} \sum c_w(z)A,$$

где $c_w(z)$ – коэффициент ветровой нагрузки конструкции и вспомогательных устройств при направлении ветра на данную секцию на высоте z метров от уровня земли; причем принимается, что эта нагрузка действует на уровне центров площадей граней, включая вспомогательные устройства, в границах высоты секции.

В свою очередь, средняя ветровая нагрузка при направлении ветра перпендикулярно оттяжке F_{GW} в плоскости оттяжки, находится так:

$$F_{GW}(z) = \frac{q_p(z)}{1 + 7I_v(z)} c_G(z)A,$$

где $c_G(z)$ – коэффициент ветровой нагрузки для данной оттяжки.

И, наконец, равномерная ветровая нагрузка $q_p(z)$ определяется для скоростей ветра на высоте, равной $2/3$ высоты крепления оттяжки к мачте.

Обратимся далее к правилам приложения ветровых нагрузок на мачту. Вполне понятно, что средняя ветровая нагрузка прикладывается по всей высоте ствола мачты, а локальные ветровые нагрузки прикладываются следующим образом: на каждый пролет ствола мачты между соседними ярусами крепления оттяжек, на про-

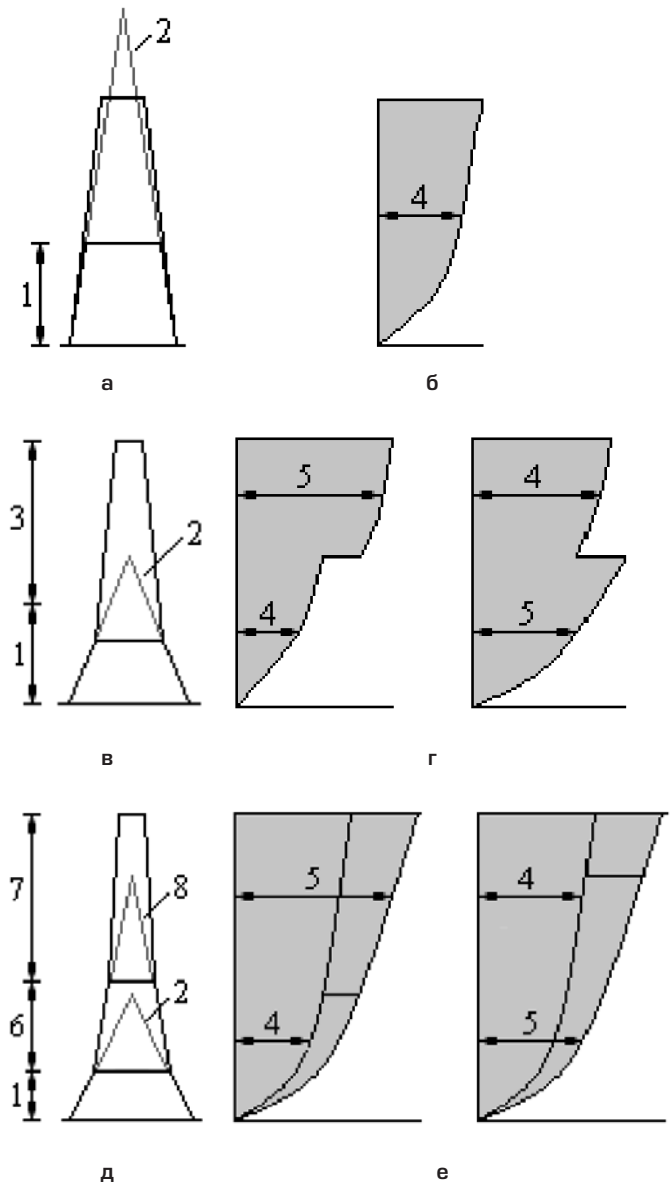


Рис. 1. К определению усилий в связевых конструктивных элементах башни:

а, в, д – одно-, двух- и трехпанельная башни соответственно; б, г, е – схемы действия ветровой нагрузки; 1 – панель «А»; 2 – проекция поясов панели «А»; 3 – панель «Б» (аналогична панели «А» в случае «а»); 4, 5 – порывы ветра (ординаты эпюры ветровой нагрузки); 6 – панель «В»; 7 – панель «Г»; 8 – проекция поясов панели «В»

лет между первым ярусом и базой мачты, на консоль, от центра до центра прилегающих пролетов, от базы мачты до середины высоты первого яруса крепления оттяжек и от середины пролета между предпоследним и последним ярусом крепления оттяжек. При этом локальные ветровые нагрузки необходимо учитывать совместно со средней ветровой нагрузкой. Схема приложения средней и локальных ветровых нагрузок представлена на рис. 2.

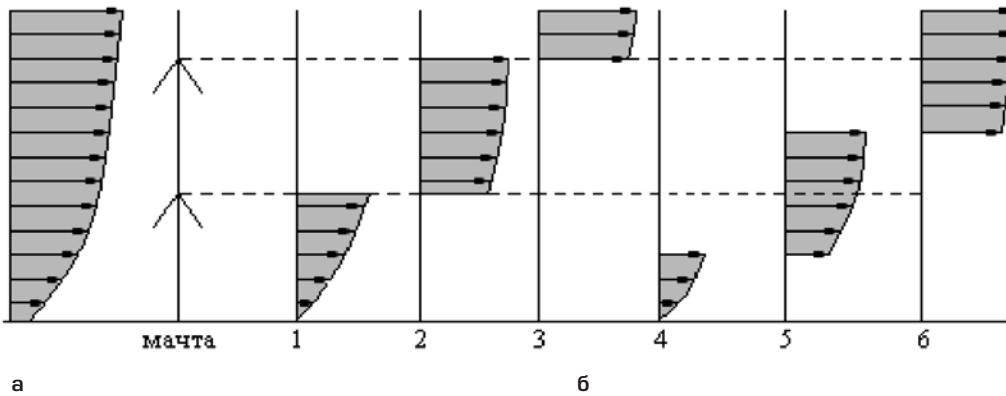


Рис. 2.
Общая схема приложения средней и локальных ветровых нагрузок на ствол мачты:
а – средняя ветровая нагрузка;
б – локальные ветровые нагрузки

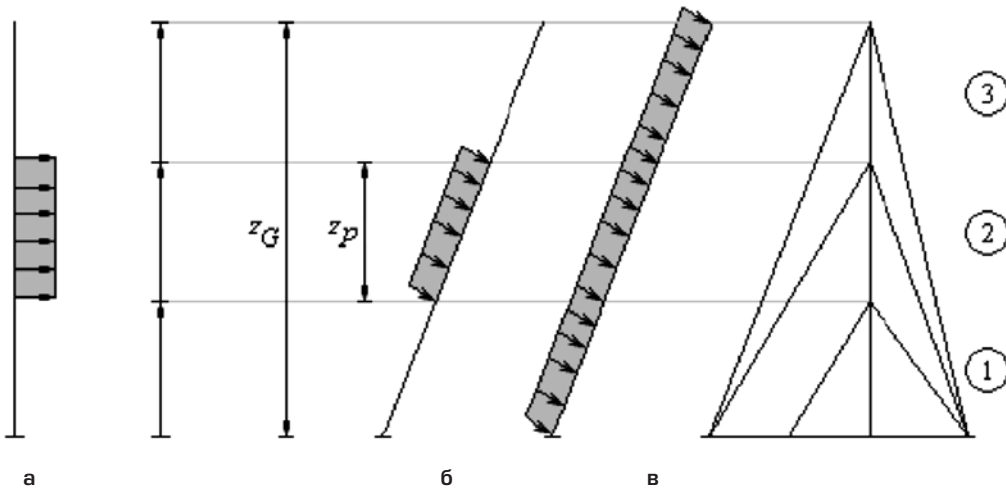


Рис. 3.
Общая схема приложения распределенных локальных нагрузок на оттяжку:
а – локальная ветровая нагрузка на ствол мачты;
б – локальная ветровая нагрузка на оттяжку № 3;
в – средняя ветровая нагрузка на оттяжку № 3

Величина же локальной ветровой нагрузки находится из выражения

$$F_{PW} = 2k_s \frac{q_p(z)}{1+7I_v(z)} \cdot \frac{I_v(z)}{c_0(z)} \sum c_w(z)A,$$

в котором дополнительно к ранее введенным обозначениям принято, что $k_s = 3,5$ – коэффициент масштабирования, учитывающий мульти-модальную реакцию мачты с оттяжками.

Обратим внимание также на то, что локальные ветровые нагрузки на оттяжки F_{PG} должны учитываться в тех же границах, что и для ствола мачты, и прикладываться перпендикулярно каждой оттяжке в плоскости, в которой расположена оттяжка, и, кроме того, совпадать с направлением ветра. А соотношение для определения их значений имеет вид

$$F_{PG} = 2k_s \frac{q_p(z)}{1+7I_v(z)} \cdot \frac{I_v(z)}{c_0(z)} \sum c_G(z)A.$$

Следует отметить, что с целью упрощения расчетных процедур локальные нагрузки могут быть распределены по всей высоте оттяжки в результате умножения их значений на отношение

z_p / z_G , где z_p – высота локальной нагрузки на оттяжке, а z_G – высота крепления оттяжки к мачте. Поясняет порядок вычисления этих параметров рис. 3, на котором изображена схема приложения распределенных локальных нагрузок по всей высоте оттяжки.

Расчет каждого элемента ствола мачты и оттяжки производится на основе последовательного приложения локальных нагрузок S_{PLi} . При этом определяется разница между воздействием локальной нагрузки в сочетании со средней ветровой нагрузкой и воздействием только средней нагрузки. И для общей реакции от локальных нагрузок S_p будем иметь:

$$S_p = \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{PLi}^2},$$

где S_{PLi} – реакция схемы i -й нагрузки; N – общее количество необходимых схем нагрузок.

А общая реакция на каждый элемент ствола мачты S_{TM} находится так:

$$S_{TM} = S_M \pm S_p,$$

где дополнительно положено, что S_M – реакция от средней нагрузки.

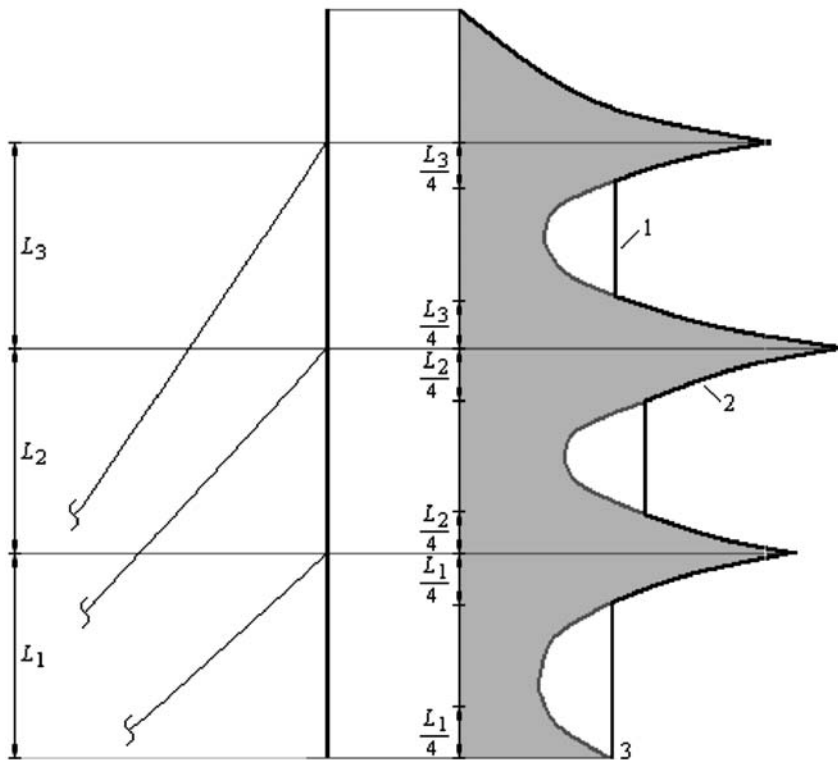


Рис. 4.
Минимальные усилия в пролетах ствола мачты:
1 – минимальное значение, используемое для данного пролета;
2 – огибающая кривая поперечных сил в результате воздействия локальной нагрузки;
3 – поперечные силы

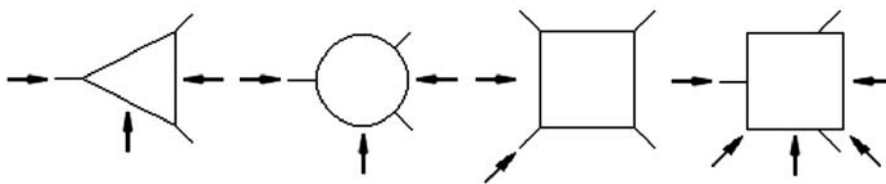


Рис. 5.
Типовые случаи направлений воздушного потока на мачту

При расчете же общего усилия в каждом пролете минимальное значение в границах пролета должно быть равно максимальному значению, вычисленному на расстоянии одной четверти пролета от узла крепления оттяжки. Пример минимальных усилий в пролетах ствола мачты показан на рис. 4.

Представляется важным также то, что при расчете мачт необходимо учитывать направление воздушного потока, а именно: для трехгранных мачт три направления – 90°, 60° и 30° к грани и для четырехгранных мачт два направления – перпендикулярно грани и под 45° к грани. Типовые случаи учитываемых в расчете направлений ветра изображены на рис. 5.

- [1] Національний стандарт України. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–4. Загальні дії. Вітрові навантаження. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010 (EN 1991-1-4:2005, IDT). – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 165 с.
- [2] Національний стандарт України. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 3 – 1. Башти, щогли і димові труби. Башти і щогли. ДСТУ-Н Б EN 1993-3-1:201X (EN 1993-3-1:2007, IDT). Друга, остаточна редакція. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 201X. – 123 с.
- [3] Зміна № 1 до ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010 (EN 1991-1-4:2005, IDT). Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–4. Загальні дії. Вітрові навантаження. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. – 14 с.

Надійшла 10.05.2016 р.