

ОБ ОДНОМ АСПЕКТЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА ВЫСОТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕВРОКОДА

Согласно Еврокоду [1] силу ветра F_w , действующую на конструкцию, находят с использованием коэффициентов силы и вычислением сил давлений на поверхности. При этом определяться сила может как непосредственно на конструкцию или ее компонент с помощью соотношения

$$F_w = c_s c_d c_f q_p(z_e) A_{ref},$$

так и векторным сложением сил, действующих на ее отдельные конструктивные элементы, с использованием следующей формулы:

$$F_w = c_s c_d \sum_{elements} c_f q_p(z_e) A_{ref},$$

в которых обозначено: c_s – коэффициент размера; c_d – динамический коэффициент; c_f – коэффициент силы для конструкции или ее конструктивного элемента; $q_p(z_e)$ – максимальный скоростной напор на базовой высоте z_e ; A_{ref} – базовая (относительная) площадь конструкции или ее конструктивного элемента.

Также обратим внимание на то, что в Еврокоде [1] произведение коэффициентов c_s и c_d , обозначаемое через $c_s c_d$, рекомендуется применять в виде единого параметра, носящего название конструктивного коэффициента. Поскольку указанный коэффициент, как правило, имеет достаточно существенное влияние на определение значений ветровых нагрузок, действующих на высотные сооружения, остановимся подробнее на методике его вычисления.

В Еврокоде [1] величину конструктивного коэффициента предлагается устанавливать с использованием следующего выражения:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2k_p I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z_s)},$$

где помимо уже введенных обозначений по-

ложено: $c_s = \frac{1 + 7I_v(z_s) \sqrt{B^2}}{1 + 7I_v(z_s)}$ – коэффициент разме-

ра, учитывающий эффект уменьшения действия ветра от неодновременного возникновения амплитудного ветрового давления на поверх-

ность; $c_d = \frac{1 + 2k_p I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z_s) \sqrt{B^2}}$ – динамический

коэффициент, учитывающий нарастающий эффект колебаний от турбулентности в резо-



А.В. Шимановский
генеральный директор
ООО «Укринсталькон
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 «Укринсталькон
им. В.Н. Шимановского»

нансе с конструкцией; k_p – коэффициент амплитуды, определяемый как отношение максимального значения пульсационной части реакции к ее стандартному отклонению (среднеквадратичному отклонению); $I_v(z_s)$ – интенсивность турбулентности на базовой высоте z_s ; B^2 – фоновая составляющая реакции, учитывающая отсутствие полной корреляции давления на поверхность конструкции, значение которой с точки зрения безопасности рекомендуется принимать $B^2 = 1,0$; R^2 – резонансная составляющая реакции, возникающая при определенной форме колебаний вследствие турбулентности.

Далее нужно сказать о том, что в Национальном приложении [2], уточняющем положения Еврокода [1] применительно к особенностям географических, климатических и некоторых других присущих Украине условий, с целью дифференциации влияния составляющих конструктивного коэффициента на ветровое воздействие на высотные сооружения, входящие в его состав множители рекомендуется разделять.

А теперь поясним методику нахождения конструктивного коэффициента на следующем примере. Итак, требуется определить коэффициенты размера и динамичности для башни высотой $h = 70$ м и шириной $b = 2,3$ м (горизонтальный средний размер верхней трети башни), размещенной в 4-м ветровом районе. Также задается типом местности II. Кроме того, считаем, что основная собственная частота по направлению действия ветра равна $n_{1,x} = 1,04$ Гц.

Вначале определяем интенсивность турбулентности, для чего используем известную формулу

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \ln(z/z_0)}$$

В соответствии с заданными исходными данными значения входящих в эту формулу параметров будут таковы: $z = 70$ м – высота башни; $c_0(z) = 1$ – коэффициент рельефа (для долин допускается принимать равным единице); $k_I = 1$ – коэффициент турбулентности; $z_0 = 0,05$ м – для типа местности II (территория с низкой растительностью и отдельными препятствиями (деревья, здания) с минимальным интервалом в 20 высот препятствия), а $\ln(z/z_0) = \ln(70/0,05) = 7,24$.

Подстановка этих значений в приведенную выше формулу для интенсивности турбулентности дает:

$$I_v(z) = 1/(1 \cdot 7,24) = 0,138.$$

Теперь найдем масштаб турбулентности L_z , определяющий среднее значение природных ветров. Для этого воспользуемся выражением

$$L_z = L_t(z/z_t)^\alpha,$$

где $L_t = 300$ м – базовый масштаб турбулентности; $z_t = 200$ м – базовая высота; а показатель степени будет таков: $\alpha = 0,67 + 0,05 \ln 0,05 = 0,52$.

Тогда имеем:

$$L_z = 300(70/200)^{0,52} = 173.$$

Далее найдем среднюю скорость ветра, для чего воспользуемся формулой

$$v_m(z) = c_0(z) \ln(z/z_0) k_r v_b,$$

в которой следует учесть, что $k_r = 0,19$ – коэффициент местности, а базовое значение скорости ветра для 4-го ветрового района равно $v_b = 30$ м/с.

Подставляя эти значения в формулу для средней скорости ветра, получим:

$$v_m(z) = 1 \cdot 7,24 \cdot 0,19 \cdot 30 = 41,2 \text{ м/с.}$$

Безразмерную частоту колебаний башни определим в виде

$$f_L(z, n) = n L_z / v_m(z).$$

Принимая во внимание, что входящая в это соотношение частота n соответствует в рассматриваемом случае основной собственной частоте по направлению действия ветра $n_{1,x} = 1,04$ Гц получим:

$$f_L(z, n) = 1,04 \cdot 173/41,2 = 4,36.$$

Спектральную плотность колебательного процесса представим как

$$S_L(z, n) = 6,8 f_L(z, n) / [1 + 10,2 f_L(z, n)].$$

Подставляя сюда величину безразмерной частоты, будем иметь:

$$S_L(z, n) = 6,8 \cdot 4,36 / [1 + 10,2 \cdot 4,36] = 0,051.$$

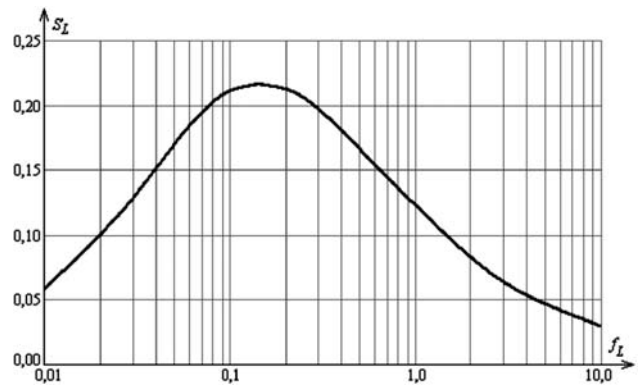


Рис. 1. График зависимости спектральной плотности от безразмерной частоты колебаний $S_L = f(f_L)$

Отметим, что, если зависимость «спектральная плотность S_L – безразмерная частота колебаний f_L » представить графически на участке изменения f_L от 0,01 до 10,0, то получим картину, изображенную на рис. 1.

Перейдем теперь к нахождению фоновой и резонансной составляющих реакции. Так, фоновая (квазистатическая) составляющая реакции, учитывающая отсутствие полной корреляции давления на поверхность конструкции, с учетом уже найденных ранее параметров определяется следующим образом:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \left(\frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} = \frac{1}{1 + 0,9 \left(\frac{2,3+70}{173} \right)^{0,63}} = 0,658.$$

Учитывая, что Еврокод [1] разрешает из соображений безопасности принимать квадрат фоновой составляющей реакции равным единице, для сравнения выполним наш расчет с учетом двух значений B^2 , а именно: 1,0 и 0,658.

Резонансная составляющая реакции, возникающая при определенной форме колебаний вследствие турбулентности, может быть записана так:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} S_L(z, n) R_h(\eta_h) R_b(\eta_b).$$

Установим значения входящих в последнее выражение аэродинамических передаточных функций R_h и R_b . Так, например, для первой аэродинамической передаточной функции R_h является справедливой такая запись:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}),$$

а входящий в это соотношение параметр η_h , в свою очередь, определяется как

$$\eta_h = \frac{4,6h}{L(z_s)} f_L(z, n) = \frac{4,6 \cdot 70}{173} \cdot 4,36 = 1,86.$$

Тогда для функции R_h окончательно имеем:

$$R_h = \frac{1}{1,86} - \frac{1}{2 \cdot 1,86^2} (1 - e^{-2 \cdot 1,86}) = 0,395.$$

Что же касается второй аэродинамической передаточной функции R_b , то для нее можем положить:

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b})$$

и, действуя далее аналогично тому, как это было выполнено ранее, получим:

$$\eta_b = \frac{4,6b}{L(z_s)} f_L(z, n) = \frac{4,6 \cdot 2,3}{173} \cdot 4,36 = 0,267;$$

$$R_b = \frac{1}{0,267} - \frac{1}{2 \cdot 0,267^2} (1 - e^{-2 \cdot 0,267}) = 0,836.$$

Определим теперь значение логарифмического декремента затухания колебаний, который описывается достаточно простым соотношением вида

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d,$$

где δ_s – логарифмический декремент конструктивного демпфирования, причем для сварных соединений его величина равна 0,02, для высокопрочных болтов – 0,03 и для обычных болтов – 0,05. Для расчета принимаем $\delta_s = 0,05$.

Второе слагаемое этой формулы δ_a является логарифмическим декрементом аэродинамического демпфирования для основной формы колебаний конструкции, а его установление выполняется так:

$$\delta_a = \frac{c_f \rho b v_m(z)}{2n_{1,x} m_e} = \frac{1,53 \cdot 1,25 \cdot 2,3 \cdot 41,2}{2 \cdot 1,04 \cdot 600} = 0,145.$$

Несмотря на то, что смысл и величины некоторых входящих в рассматриваемое выражение параметров ранее уже были раскрыты, для соблюдения дальнейшей целостности изложения приведем их в полном объеме. Итак, эти параметры понимаются здесь следующим образом: $c_f = 1,53$ – коэффициент силы для пространственных решетчатых конструкций при коэффициенте сплошности $\varphi = 0,6$ (нахождение его значения будет пояснено несколько ниже); $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$ – значение плотности воздуха, принятое в соответствии с Национальным приложением [2]; $b = 2,3 \text{ м}$ – ширина (горизонтальный средний размер верхней трети башни); $v_m(z) = 41,2 \text{ м/с}$ – средняя скорость ветра; $n_{1,x} = 1,04 \text{ Гц}$ – основная собственная частота колебаний башни по направлению действия ветра; $m_e = 600 \text{ кг/м}$ – эквивалентная масса на единицу длины для основной формы колебаний, определенная как

среднее значение, распределенное в верхней трети конструкции.

А теперь вернемся к коэффициенту силы для пространственных решетчатых конструкций c_f . Выше уже было сказано, что его значение определяется при коэффициенте сплошности $\varphi = 0,6$. Но это еще не все, поскольку значение коэффициента c_f должно корректироваться с учетом его базовой величины $c_{f,0}$ и понижающего коэффициента ψ_λ , учитывающего краевые эффекты в зависимости от гибкости стержня или, иными словами, уменьшения сопротивления конструкции от воздушного потока около ее краев по формуле

$$c_f = c_{f,0} \psi_\lambda.$$

Таким образом, принимая во внимание, что $c_{f,0} = 1,8$, а величина коэффициента ψ_λ равна 0,85 при значении гибкости

$$\lambda = 1,4 \cdot h/b = 1,4 \cdot 70/2,3 = 42,6,$$

где, напомним, по-прежнему $h = 70 \text{ м}$ – высота башни и $b = 2,3 \text{ м}$ – ее ширина, окончательно приходим к ранее учтенному при вычислении δ_a значению $c_f = 1,8 \cdot 0,85 = 1,53$.

Соответствующие графики, отображающие поведение коэффициента силы в зависимости от коэффициента сплошности, построенные для высотных сооружений с различными видами треугольных и квадратных поперечных сечений, представлены на рис. 2, а графическая зависимость коэффициента краевых эффектов от гибкости стержня при разных значениях коэффициента сплошности φ – на рис. 3.

И, наконец, в части третьего слагаемого формулы для определения логарифмического декремента затухания колебаний – δ_d , отметим, что это слагаемое является логарифмическим декрементом демпфирования от воздействия демпфирующих устройств. В нашем случае принимаем, что демпфирующие устройства отсутствуют, и тогда вполне очевидно, что $\delta_d = 0$.

И только теперь, зная значения всех трех слагаемых логарифмического декремента затухания колебаний, имеем возможность окончательно установить его величину. Таким образом, получаем:

$$\delta = 0,05 + 0,145 = 0,195.$$

С учетом последнего результата находим квадрат величины резонансной составляющей реакции:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,195} \cdot 0,051 \cdot 0,395 \cdot 0,836 = 0,426.$$

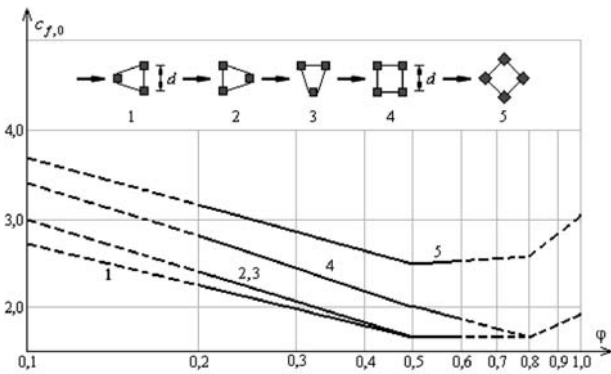


Рис. 2. График зависимости коэффициента силы для пространственных решетчатых конструкций с элементами из уголков от коэффициента сплошности $c_f = f(\varphi)$

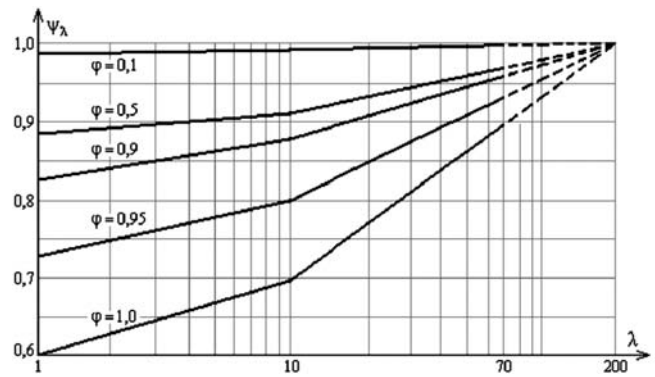


Рис. 3. График зависимости коэффициента краевых эффектов (понижающего коэффициента) от гибкости стержня $\psi_\lambda = f(\lambda)$

Далее находим другие необходимые расчетные параметры, необходимые для нахождения конструктивного коэффициента. В частности, эффективная частота колебаний башни ν находится так:

- случай $B^2 = 1$

$$\nu = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} = 1,04 \cdot \sqrt{\frac{0,426}{1 + 0,426}} = 0,568 ;$$
- случай $B^2 = 0,658$

$$\nu = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} = 1,04 \cdot \sqrt{\frac{0,426}{0,658 + 0,426}} = 0,651 .$$

А коэффициент амплитуды k_p , физический смысл которого определяется отношением максимального значения пульсационной составляющей реакции к ее стандартному отклонению, может быть представлен как

$$k_p = \sqrt{2 \ln(\nu T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \ln(\nu T)}} ,$$

где T – период осреднения скорости ветра.

Тогда имеем:

- случай $B^2 = 1$

$$k_p = \sqrt{2 \ln(0,568 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \ln(0,568 \cdot 600)}} = 3,41 + 0,175 = 3,58 ;$$
- случай $B^2 = 0,658$

$$k_p = \sqrt{2 \ln(0,651 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \ln(0,651 \cdot 600)}} = 3,45 + 0,174 = 3,62 .$$

Причем здесь следует заметить, что при выполнении последних вычислений было учтено, что период осреднения скорости ветра составляет $T = 600$ с.

Также отметим то, что на этом, наконец, заканчивается процесс нахождения всех параметров, необходимых для установления значений

как составляющих конструктивного коэффициента, так и самого этого коэффициента в целом.

Итак, вычисляем коэффициент размера c_s :

- случай $B^2 = 1$

$$c_s = \frac{1 + 7 \cdot 0,138 \cdot \sqrt{1,0}}{1 + 7 \cdot 0,138} = 1 ;$$
- случай $B^2 = 0,658$

$$c_s = \frac{1 + 7 \cdot 0,138 \cdot \sqrt{0,658}}{1 + 7 \cdot 0,138} = 0,91 .$$

Теперь вычисляем динамический коэффициент c_d :

- случай $B^2 = 1$

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot 3,58 \cdot 0,138 \cdot \sqrt{1,0 + 0,426}}{1 + 7 \cdot 0,138 \cdot \sqrt{1,0}} = 1,11 ;$$
- случай $B^2 = 0,658$

$$c_d = \frac{1 + 2 \cdot 3,62 \cdot 0,138 \cdot \sqrt{0,658 + 0,426}}{1 + 7 \cdot 0,138 \cdot \sqrt{1,0}} = 1,04 .$$

А теперь вычисляем конструктивный коэффициент:

- случай $B^2 = 1$ $c_s c_d = 1,0 \cdot 1,11 = 1,11 ;$
- случай $B^2 = 0,658$ $c_s c_d = 0,91 \cdot 1,04 = 0,95 .$

Как видим, при выполнении рекомендаций Еврокода [1] в части принятия квадрата фоновой составляющей реакции равным единице, величина конструктивного коэффициента возрастает до 15 %.

[1] Національний стандарт України. Еврокод 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). – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 165 с.

[2] Зміна № 1 до ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010 (EN 1991-1-4:2005, IDT). Еврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–4. Загальні дії. Вітрові навантаження. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. – 14 с.