

Глава 4. ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЕТРА НА СООРУЖЕНИЯ

4.1. Пульсации ветрового напора. Спектральные кривые

В первом разделе нашего курса мы затронули вопрос об определении статической составляющей нагрузки от действия ветра¹. В теории статического давления предполагается, что движение воздуха *ламинарное* - гладкое упорядоченное. Линии тока в таком течении параллельны между собой. Скорость движения воздуха в таком потоке изменяется по высоте из-за трения его о поверхность земли. Мы ранее обращали внимание на законы изменения скоростей по высоте в зависимости от местности, на которой находятся здания и сооружения. Давление воздушного потока пропорционально квадрату скорости и аэродинамическому коэффициенту обтекания. Этот коэффициент определяют экспериментально (например, в аэродинамических трубах).

При определенных параметрах скорости ламинарное движение воздуха становится неустойчивым. Частицы воздуха в направлении основного движения перемещаются неравномерно по изменяющимся во времени и в пространстве траекториям (внутри потока появляется беспорядочное внутреннее движение, которое называют *турбулентным*). Если усреднить скорость движения, то нерегулярность сглаживается, и средняя скорость вдоль потока и по высоте меняется плавно и подчиняется законам, которые мы обсуждали в упомянутом выше разделе учебника при ламинарном движении. Разность между средней и истинной скоростью называют *пульсационной составляющей скорости*. Для зданий и сооружений такой ветер является причиной вибрации конструкций.

В отличие от сейсмической нагрузки ветровая действует на надземную часть здания и основной вклад в нагрузку вносит скоростная составляющая. Формула Лаппо - Морисона для вычисления удельной нагрузки (приходящейся на единицу наветренной площади) имеет вид:

$$S = g \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = 0.613 \cdot v^2, \quad (4.1)$$

где ρ - плотность воздуха - 0.125 кг / м^3 , v - скорость ветра - м/с, постоянный коэффициент равен произведению известных величин $9.81 \cdot 0.5 \cdot 0.125 = 0.613 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$.

В результате обработки данных наблюдений за ветром получены средние расчетные скорости на высоте 10 м от уровня земли на открытой местности, ко-

¹ Стоценко А.А., Доценко С.И., Мальков Н.М., Белоконов М.А., Ченз Т., Рудченко С. Курс теории сооружений (строительная механика). Ч. 1. Теория сооружения в инженерном деле. Разд. 1, Концепция сил в строительной механике. - Владивосток, 2001.

торые однократно превышаются в течение заданного периода времени ² (см. табл. 4.1), и по ним любая территория может быть разделена на семь ветровых районов.

Таблица 4.1

Скорость ветра по ветровым районам на высоте 10 м на открытой местности v_{cp10} , рассчитанная по показаниям малоинерционных анемометров ³

Однократное превышение в период времени	номер района по карте районирования (см. Курс теории сооружений ⁴)						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Год	17.0	20.0	23.5	27.0	30.0	33.1	36.0
5 лет	20.8	23.8	27.3	31.3	34.1	37.7	40.4
10 лет	22.0	25.8	29.0	32.8	36.2	39.5	44.5
20 лет	23.5	27.0	31.0	34.2	38.0	41.2	45.0
30 лет	24.0	27.4	31.5	35.0	38.6	41.8	45.8
50 лет	25.0	29.2	32.8	36.5	40.0	43.2	48.0

Сама природа ветра, когда на среднюю скорость накладываются его порывы, подсказывает, что скорость можно представить в виде суммы средней скорости - v_{cp} и ее пульсационной части - v_n .

Изменение средних скоростей ветра по высоте z подчиняется статистическому закону

$$v_{cpz} = v_{cp} = v_{cp10} \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha = k_z v_{cp10} . \quad (4.2)$$

В формуле (4.2) коэффициент для открытой местности (тип А) с очень небольшими препятствиями (степь, тундра, берега и низкие острова внутренних озер) - $\alpha = 0.16$; Для местности (тип В), равномерно покрытой препятствиями высотой 10 ÷ 15 метров (жилые окраины городов, лесные массивы) - $\alpha = 0.22$. Для местности (тип С) с большими препятствиями (центры больших городов) - $\alpha = 0.33$ (значения k_z приведены в табл. 2.8 учебника ⁴).

Введем в расчет коэффициент пульсации (порывистости) - μ , показывающий отношение пульсационной составляющей v_n к средней скорости ветра v_{cp} :

² Барштейн М.Ф. Динамический расчет высоких сооружений на действие ветра. Справочник по динамике сооружений. - М.: Стройиздат, 1972.

³ Анемометр - прибор для измерения скорости ветра, основанный на измерении угловой скорости вращения вала, оборудованного специальными устройствами – чашечками, переводящими поступательное движение ветра во вращательное движение вала.

⁴ Стоценко А.А., Доценко С.И., Мальков Н.М., Белоконов М.А., Ченз Т., Рудченко С. Курс теории сооружений (строительная механика). Ч. 1. Теория сооружения в инженерном деле. Разд. 1. Концепция сил в строительной механике. - Владивосток, 2001.

$$v_{nz} = v_{cp} \cdot \mu_z \quad (4.3)$$



Рис. 4.1. Запись изменения скорости ветра во времени

Статистическая обработка записей распределения скорости ветра во времени (рис. 4.1) показала, что коэффициент пульсации ветра зависит главным образом от шероховатости местности. С достаточно большой надежностью можно утверждать, что максимальное значение коэффициента пульсации составляет на высоте до 10 м от поверхности земли - $\mu_{10} = 0.38$, а для высот более 10 м он уменьшается по закону

$$\mu_z = \mu_{10} \cdot \left(\frac{10}{z} \right)^\alpha, \quad (4.4)$$

где z - высота рассматриваемой точки, $\alpha = 0.16, 0.22, 0.33$ в зависимости от шероховатости (типа местности - А, В, С соответственно).

С учетом уравнений (4.2), (4.3) и (4.4) можно заключить, что величина пульсационной составляющей скорости v_{nz} мало зависит от высоты рассматриваемой точки (табл. 4.2).

Зависимость величины пульсационного коэффициента μ от времени не аналитическая, а случайная (рис. 4.1) и является отражением случайного процесса - пульсаций. Выборочную функцию случайного процесса называют *случайным сигналом*.

В нашем случае μ имеет среднее значение, равное нулю, оно выражает относительное отклонение от среднего значения скорости, а среднеквадратичное отклонение его не изменяется во времени. Такой процесс называют *стационарным*. Стационарный процесс в практических приложениях удобно рассматривать как суперпозицию гармонических функций в непрерывном интервале частот - $\tilde{\omega}$ (или периодов - $T = 2\pi/\tilde{\omega}$).

Таблица 4.2

Коэффициент увеличения скоростного напора k (вверху графы) и изменения коэффициента пульсаций ветра μ (внизу графы) по высоте

Тип местности	Высота								
	от поверхности земли в м								
	<5	10	20	40	60	100	200	300	>480
А - незащищенная	0.75	1.00	1.25	1.50	1.70	2.00	2.45	2.75	2.75
	0.85	0.76	0.69	0.62	0.58	0.54	0.49	0.46	0.46
В - с препятствиями (растительностью, зданиями) высотой более 10 м	0.64	0.76	0.86	0.96	0.99	1.08	1.20	1.26	1.26
	0.50	0.65	0.85	1.10	1.30	1.60	2.10	2.5	2.75
	1.22	1.06	0.92	0.8	0.58	0.67	0.58	0.54	0.5
С - то же высотой более 25 м	0.40	0.40	0.55	0.80	1.00	1.25	1.80	2.35	2.75
	1.78	1.78	1.50	1.26	1.14	1.00	0.84	0.76	0.68

П р и м е ч а н и е. Сооружение считается расположенным в местности данного типа, если она сохраняется с наветренной стороны на расстоянии $30h$ при высоте сооружения $h < 60$ м и 2 км при большей высоте.

С помощью известного интеграла Фурье⁵ уравнение этого процесса представляется суммой (в пределе интегралом) гармонических функций $\cos(2\pi\tilde{\omega} \cdot t - \varphi(\tilde{\omega}))$:

$$\mu(t) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tilde{\omega}) \cdot \cos(2\pi\tilde{\omega} \cdot t - \varphi(\tilde{\omega})) d\tilde{\omega}, \quad (4.5)$$

где

$$C(\tilde{\omega}) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu(t) \cdot \cos(2\pi\tilde{\omega} \cdot t - \varphi(\tilde{\omega})) dt,$$

$$\varphi(\tilde{\omega}) = \arctan \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \mu(t) \cdot \cos(2\pi\tilde{\omega} \cdot t) \cdot dt}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu(t) \cdot \sin(2\pi\tilde{\omega} \cdot t) \cdot dt}.$$

Так как среднее значение функции $\mu = 0$, то среднеквадратичное отклонение (дисперсия) - σ^2 определится как интеграл (сумма) квадратов отклонений самой функции μ . Преобразования, произведенные с учетом соотношений (4.5), дают:

⁵ Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. - М: Изд-во ТТЛ, 1956.

$$\begin{aligned}
2\sigma^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} \mu^2(t) \cdot dt = \int_{-\infty}^{\infty} \mu(t) \int_{-\infty}^{\infty} C(\tilde{\omega}) \cdot \cos 2\pi \tilde{\omega} \cdot t - \phi(\tilde{\omega}) d\tilde{\omega} \cdot dt = \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} C(\tilde{\omega}) \int_{-\infty}^{\infty} \mu(t) \cdot \cos 2\pi \tilde{\omega} \cdot t - \phi(\tilde{\omega}) d\tilde{\omega} \cdot dt = \int_{-\infty}^{\infty} C^2(\tilde{\omega}) \cdot d\tilde{\omega} = 2 \int_0^{\infty} C^2(\tilde{\omega}) \cdot d\tilde{\omega}
\end{aligned}$$

и показывают, что $\sigma^2 = \int_0^{\infty} C^2(\tilde{\omega}) \cdot d\tilde{\omega}$,

или при замене $C^2(\tilde{\omega})$ на $F(\tilde{\omega})$ получим, что $\sigma^2 = \int_0^{\infty} F(\tilde{\omega}) \cdot d\tilde{\omega}$. (4.6)

Функцию $F(\tilde{\omega}) = C^2(\tilde{\omega})$ ($C(\tilde{\omega}) = \sqrt{F(\tilde{\omega})}$) называют *спектральной плотностью* функции $\mu(t)$. Значение дисперсии может быть получено по уравнению (4.6) как площади, ограниченной спектральной кривой на всем интервале реализации процесса. Из приведенных выше рассуждений следует также, что при известной записи случайного процесса, например, в виде графика можно получить зависимость спектральной плотности от частоты (рис. 4.2), и с заданной обеспеченностью - найти величину коэффициента пульсации.

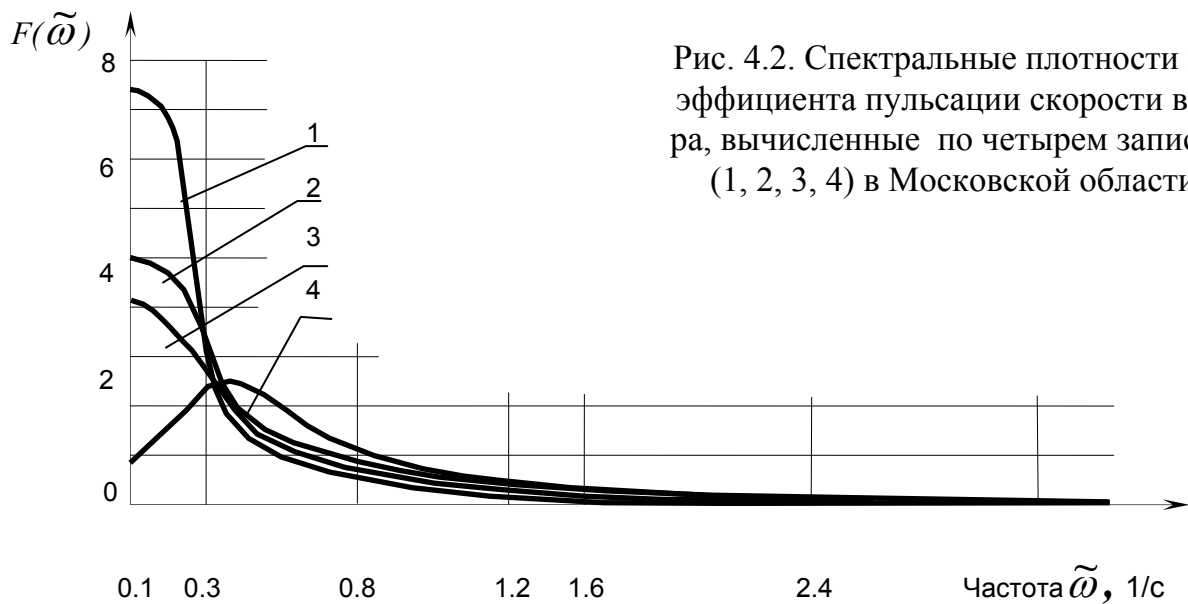


Рис. 4.2. Спектральные плотности коэффициента пульсации скорости ветра, вычисленные по четырем записям (1, 2, 3, 4) в Московской области

Таким образом, пульсационная составляющая скорости ветра характеризуется коэффициентом пульсации μ (отношение отклонения скорости ветра от среднего значения к этому значению), который может быть найден через спектральную плотность. Спектральная плотность показывает также значение коэффициента пульсации, соответствующего заданной частоте.

4.2. Уравнения движения точечного сооружения под действием ветра

Точечное в плане сооружение представляется консольным стержнем. Под действием ветровой нагрузки выше поверхности земли оно движется горизонтально, поэтому на произвольную точку консольного сооружения, находящегося в инерционной среде, будет действовать нагрузка, определяемая по формуле Лаппо - Морисона через ускорение горизонтального движения сооружения в этой точке - \ddot{y} , скорость движения - \dot{y} и скорости перемещения частиц воздуха - v (4.1):

$$\begin{aligned} S &= -(m \cdot \ddot{y} + k \cdot \dot{y} - c \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{v^2}{2}) = \\ &= -(m \cdot \ddot{y} + k \cdot \dot{y} - \frac{1}{2} c \cdot \rho \cdot A (v_{cp} + v_n)^2) = \\ &= -(m \cdot \ddot{y} + k \cdot \dot{y} - \frac{1}{2} c \cdot \rho \cdot A \cdot v_{cp}^2 - c \cdot \rho \cdot v_{cp} \cdot v_n \cdot A - \frac{1}{2} c \cdot \rho \cdot v_n^2 \cdot A), \end{aligned} \quad (4.7)$$

где A - площадь слоя единичной по высоте ширины наветренной поверхности, c - аэродинамический коэффициент, зависящий от формы сооружения (определяется в основном экспериментально).

Ввиду того, что расчет на статическую составляющую ветровой нагрузки $S_{cm} = \frac{1}{2} c \cdot \rho \cdot A \cdot v_{cp}^2 = 0.613 \cdot c \cdot A \cdot v_{cp}^2$ может быть выполнен традиционным способом⁶, по закону суперпозиции исключим эту составляющую из уравнения (4.7). Коэффициент пульсации ветрового напора мал и поэтому нагрузку, пропорциональную квадрату пульсационной составляющей, также можно исключить, поэтому

$$\begin{aligned} S - S_{cm} &= -(m \cdot \ddot{y} + k \cdot \dot{y} - c \cdot \rho \cdot v_{cp} \cdot v_n \cdot A) = -(m \cdot \ddot{y} + k \cdot \dot{y} + \\ &- \frac{1}{2} c \cdot \rho \cdot A \cdot v_{cp}^2 (2\mu)) = -(m \cdot \ddot{y} + k \cdot \dot{y} - S_{cm} \cdot \xi), \end{aligned} \quad (4.8)$$

где $\xi = 2 \cdot \mu$.

В дифференциальной постановке уравнение движения, представляющее собой условие равновесия малого элемента сооружения под действием нагрузки в инерционной среде будет иметь вид (см. главу 2):

⁶ Стоценко А.А., Доценко С.И., Мальков Н.М., Белоконов М.А. Тони Ченз, Серж Рудченко, Курс теории сооружений. Ч. 1. Теория сооружений в инженерном деле. Глава 2. Нагрузка. – Владивосток, 2001.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} = -m \cdot \ddot{y} - k \cdot \dot{y} + S_{cm} \cdot \xi,$$

после переноса в левую часть неизвестных перемещений сооружения относительно фундамента и соответствующих производных будем иметь уравнение

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + k \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = S_{cm} \cdot \xi, \quad (4.9)$$

которое совпадает с уравнением вынужденных колебаний стержня при

$$q(t) = S_{cm} \cdot \xi(t).$$

Решение уравнения (4.5) будем искать в виде

$$w(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} m \cdot y_i(z) \cdot \Phi_i(t), \quad (4.10)$$

предварительно разложим нагрузку по формам колебаний

$$q(z, t) = S_{cm} \cdot \xi = \sum_{i=1}^{\infty} m \cdot y_i(z) \cdot q_i(t), \quad (4.11)$$

$$\text{где } q_i(t) = \xi(t) \frac{\int_0^l S_{cm} \cdot y_i \cdot dz}{\int_0^l m \cdot y_i^2 \cdot dz} = \xi(t) \cdot S_{cm} \cdot \eta_i \quad \text{и} \quad \eta_i = \frac{\int_0^l y_i \cdot dz}{\int_0^l m \cdot y_i^2 \cdot dz}.$$

После подстановки одного из членов суммы (4.10) и (4.11) в (4.9) и деления на произведение $m \cdot w_i \cdot \Phi_i$, получим равенство, каждая часть которого не зависит от координаты и времени, то есть равна постоянной величине:

$$EI \frac{1}{m \cdot w_i} \cdot \frac{d^4 y_i}{dz^4} = - \frac{\frac{d^2 \Phi_i}{dt^2} + \frac{k}{m} \cdot \frac{d \Phi_i}{dt} - q_i}{\Phi_i} = -\omega_i^2 \quad (4.12)$$

(ω_i - постоянная величина – частота собственных колебаний).

Приравняв каждую часть уравнения (4.12) постоянной величине, получим два уравнения. Первое из них: $EI \frac{d^4 y_i}{dz^4} + m \cdot \omega_i^2 y_i = 0$ представляет собой однородное уравнение (ненулевым решением его являются формы колебаний соответствующие частоте ω_i , при которой возможно это ненулевое решение).

Второе уравнение $\ddot{\Phi}_i + 2\alpha \cdot \dot{\Phi}_i + \omega_i^2 \Phi_i = \eta_i \cdot q_i \cdot \xi$ или $\omega_i^2 \Phi_i = \eta_i \cdot q_i \cdot \xi - \ddot{\Phi}_i - 2\alpha \cdot \dot{\Phi}_i$ ($\alpha = k/2m$) по виду и решению совпадает с уравнением (2.2), если в нем заменить \ddot{x}_0 на $\ddot{\eta}_i \cdot \xi$, а x на Φ_i , поэтому

$$\Phi_i = \frac{1}{\varpi_i} \eta_i \int_0^t S_{cm} \cdot \xi(u) \cdot \exp(-\alpha(t-u)) \cdot \sin(\varpi_i(t-u)) du,$$

где $\xi(t) = 2\mu(t) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} C(\tilde{\omega}) \cdot \cos(2\pi\tilde{\omega} \cdot t - \varphi(\tilde{\omega})) d\tilde{\omega}$,

тогда $\Phi_i = \frac{2}{\varpi_i^2} \eta_i \int_{-\infty}^{\infty} C(\tilde{\omega}) \cdot \cos(2\pi\tilde{\omega} \cdot t - \varphi(\tilde{\omega})) \cdot \lambda \cdot S_{cm} \cdot d\tilde{\omega}$,

где $\lambda = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\tilde{\omega}^2}{\varpi_i^2})^2 + 4 \frac{\alpha^2 \cdot \tilde{\omega}^2}{\varpi_i^4}}}$ называют передаточной функцией.

Амплитудное (максимальное) значение $\Phi_{i \max}$ можно выразить через среднее отклонение (стандарт) величины скорости от среднего значения по уравнению (3.6):

$$\Phi_{i \max} = \frac{2}{\varpi_i^2} \eta_i \int_{-\infty}^{\infty} S_{cm} \cdot \beta \sqrt{F(\tilde{\omega})} \cdot \lambda \cdot d\tilde{\omega} = \frac{2}{\varpi_i^2} \eta_i \cdot S_{cm} \cdot \zeta, \quad (4.13)$$

где β - число стандартов (среднеквадратичных отклонений), определяющих вероятность превышения среднего значения (при $\beta = 3, 2.5$ и 2 эта вероятность соответственно равна 0.27% , 1.23% и 4.55%); ζ - коэффициент динамичности, зависящий от логарифмического декремента затухания и отношения нормативной скорости движения воздуха, возможной один раз в пять лет (табл. 4.1) к частоте собственных колебаний сооружения (рис. 4.3).

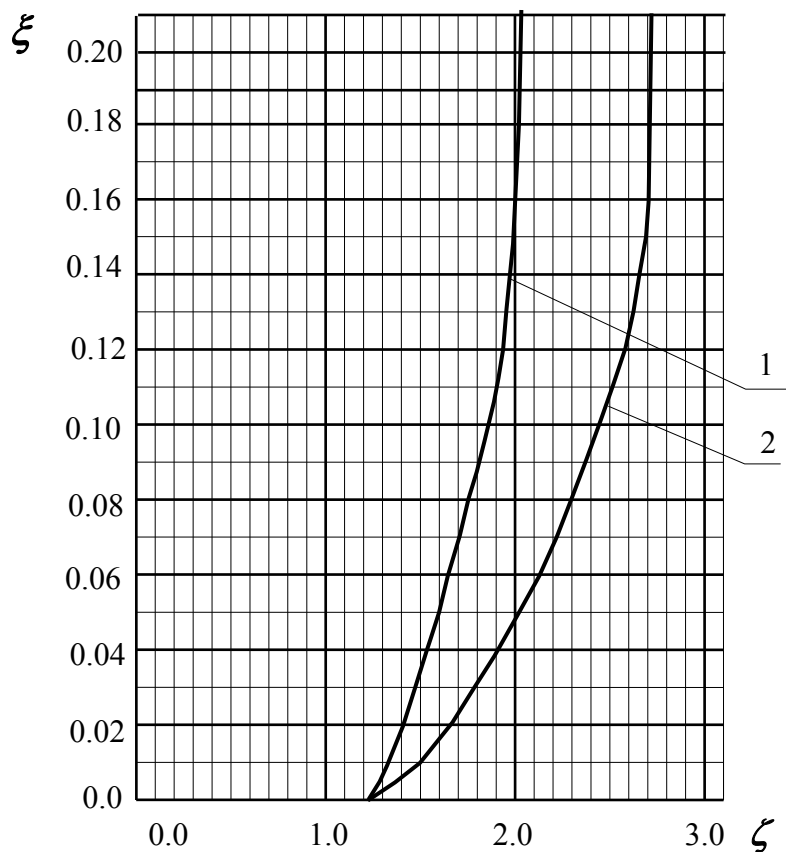


Рис. 4.3. Коэффициент динамичности ξ в зависимости от параметра

по СНиП 2.01.07-85* $\xi = \frac{\sqrt{\gamma_f \cdot w_0}}{940 f}$

или, что одно и тоже, $\xi = \frac{\sqrt{1.4 \cdot 0.613 \cdot v_{cp10}^2}}{940} \frac{2\pi}{\omega} = 0.0062 \cdot \frac{v_{cp10}}{\omega}$

от отношения нормативной скорости движения воздуха, возможной один раз в пять лет к частоте собственных колебаний сооружения:

- 1 - для железобетонных, каменных конструкций и зданий со стальным каркасом с ограждающими конструкциями ($\delta = 0.3$);
- 2 - для стальных башен, труб, сооружений колонного типа, в том числе на железобетонных фундаментах ($\delta = 0.15$)

4.3. Нагрузка от воздействия порывов ветра. Спектральная методика

Динамическую составляющую от порывов ветра определим в инерционной среде по формуле Лаппо - Морисона (4.7):

$$S_{дин} = S - S_{cm} = -(m \cdot \ddot{y} + k \cdot \dot{y} - S_{cm} \cdot \xi),$$

которое с учетом разложений (4.10) и (4.11) примет вид ($\kappa = 2m\alpha$)

$$S_{дин} = \sum_{i=1}^{\infty} (\eta_i \cdot q_i \cdot m \cdot y_i + m \cdot y_i \cdot \ddot{\Phi}_i + 2\alpha \cdot m \cdot y_i \cdot \dot{\Phi}_i),$$

или с учетом вида временного уравнения в (4.13):

$$S_{дин} = \sum_{i=1}^{\infty} m \cdot y_i (-\xi \cdot S_{cm} \cdot \eta_i + \ddot{\Phi}_i + 2\alpha \cdot \dot{\Phi}_i), \text{ которое можно заменить на}$$

$$S_{дин} = \sum_{i=1}^{\infty} S_i = \sum_{i=1}^{\infty} m \cdot y_i \cdot \omega_i^2 \cdot \Phi_i$$

Учитывая замеченное выше совпадение уравнений движения при сейсмическом (2.2) и ветровом воздействиях можно найти максимальное значение нагрузки, соответствующее одной частоте - ω_i (или периоду $T_i = 2 \cdot \pi / \omega_i$):

$$S_{i\max} = m \cdot y_i \cdot \omega_i^2 \cdot \Phi_{i\max} = m \cdot \eta_i \cdot y_i \cdot S_{cm} \cdot \zeta, \quad (4.14)$$

где m - масса сооружения, y_i - координаты формы колебаний, соответствующие

$$\text{частоте } \omega_i : \eta_i = \frac{\int_0^l m \cdot y_i \cdot dz}{\int_0^l m \cdot y_i^2 \cdot dz}, \quad S_{cm} - \text{статическая составляющая ветровой нагрузки.}$$

Как видно из зависимости величины спектральной плотности от частоты (рис. 4.2), спектральная плотность и, следовательно, отклонение от средней скорости значительно при малых частотах (больших периодах) и практически равно нулю при больших частотах (малых периодах). Предельное значение частот с минимальной плотностью, полученное путем обработки многочисленных записей скорости ветра, показывает, что оно зависит от средней скорости ветра, а вклад в нагрузку зависит от передаточной функции, на которую влияет степень затухания (рис. 4.4) (характеризуемая, например, логарифмическим декрементом - δ).

В расчетах на ветровую нагрузку учитываются все формы колебаний, частота которых меньше предельных значений.

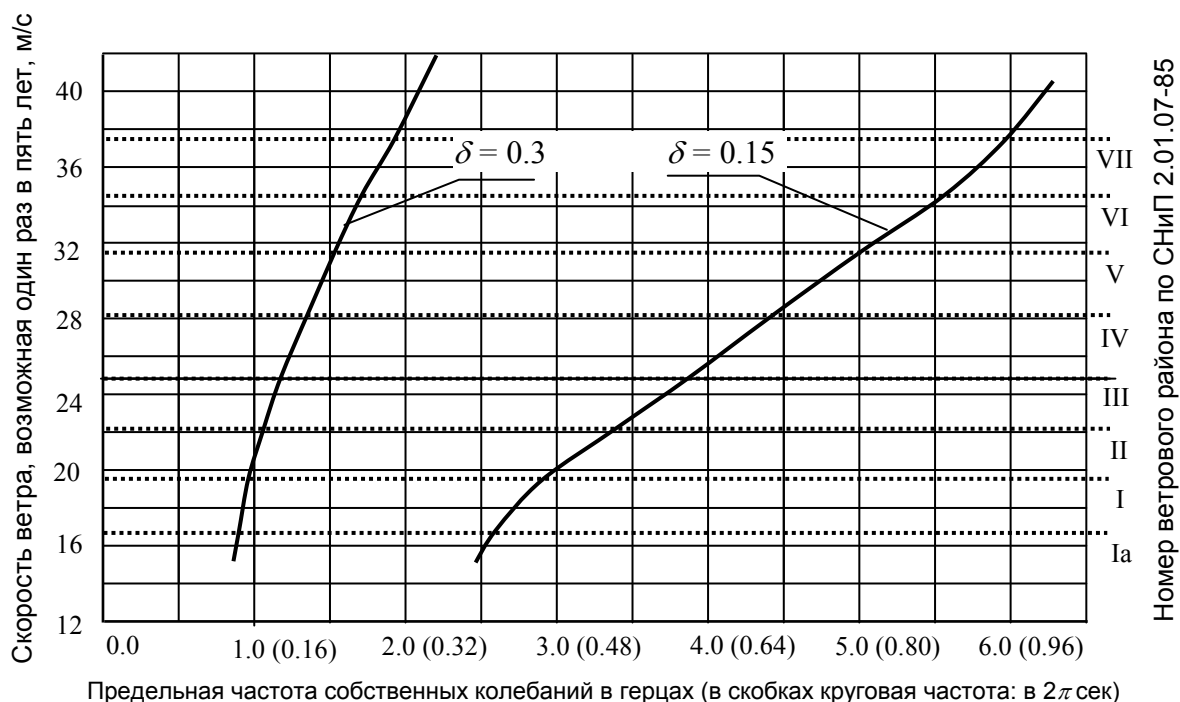


Рис. 4.4. Предельное значение собственной частоты, при котором допускается не учитывать силы инерции от порывов ветра

4.4. Методика и примеры определения ветровой нагрузки на сооружения

Методику определения ветровой нагрузки покажем на примерах высотных сооружений.

Пример 4.1. Определить ветровую нагрузку на решетчатую радиотрансляционную башню в г. Уссурийске. Высота башни 40.6 м (рис. 4.5). Четыре стойки выполнены из трубы диаметром 133мм с толщиной стенки 6 мм. Решетка исполнена из труб диаметром 89мм с толщиной стенки 4.5 мм.

Решение. Ветровая нагрузка определяется как сумма средней (статической) и пульсационной составляющих.

1. Определение средней (статической) составляющей ветровой нагрузки

Расчетное значение средней составляющей нагрузки, распределенной по площади, вычисляется по формуле СНиП 2.01.07-85*:

$$S_{cm} = w_m = w_o \cdot k \cdot c \cdot \gamma_f$$

через w_o – нормативное значение ветрового давления, принимаемое в зависимости от ветрового района, k – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте, принимается по табл. 6 СНиП 2.01.07-85*, c – аэродинамический коэффициент, зависящий от схемы сооружения, принимается по приложению 4 СНиП 2.01.07-85*, γ_f – коэффициент надежности по нагрузке, принимаемый для ветровой нагрузки равным 1.4.

Нормативное давление ветра для третьего района (г. Уссурийск) $w_o = 0.45$ кПа. Коэффициент k учитывает изменение ветрового напора по высоте и зависит от типа местности. Башня находится на открытой площадке, что соответствует типу местности А.

Аэродинамический коэффициент c для решетчатой башни определяется по формуле:

$$c = c_e = c_x(1 + \eta)k_l = 0.25 \cdot (1 + 0.79) \cdot 1.0 = 0.45,$$

где:

$$c_x = \frac{1}{A_k} \sum c_{xi} A_i = \frac{1}{81.2} \cdot 1.2 \cdot (0.26 \cdot 42 + 0.13 \cdot 42) = 0.25.$$

Коэффициент c_{xi} – аэродинамический коэффициент i -го элемента конструкций, для трубчатых элементов определяется по графику к схеме 14 приложения 4, СНиП 2.01.07-85* в зависимости от числа $Re = 0.88d\sqrt{w_0 k \gamma_f} \cdot 10^5 = 0.88 \cdot 0.133 \cdot \sqrt{0.45 \cdot 1.51 \cdot 1.4} \cdot 10^5 = 0.114 \cdot 10^5$ ($d = 0.133$ м – диаметр; для высоты 40.6 м - $k = 1.51$) следовательно, $c_{xi} = 1.2$; A_i – площадь проекции i -го элемента на плоскость конструкции (на напорной грани по высоте башни стойки состоят из 42 элементов трубчатого сечения длиной 1.94 м каждый: $A_i = 0.133 \cdot 1.94 = 0.26$ м²; на напорной грани башни имеется 42 раскоса трубчатого сечения длиной 2.23 м каждый, $A_i = 0.054 \cdot 2.23 = 0.13$ м²).

Коэффициент η определяется по СНиП в зависимости от коэффициента заполнения: $\varphi = (\sum A_i)/A_k = 16.38 / 81.2 = 0.20 < 0.8$, и соотношения размеров поперечного сечения башни: $b/h = 1.60/2 = 0.80$, по схеме 16 приложения 4 СНиП 2.01.07-85: $\eta = 0.79$. Здесь A_k – площадь, ограниченная контуром конструкции:

$$A_k = 2,0 \cdot 40,6 = 81.2 \text{ м}^2.$$

Значения коэффициента k_l принимаются в зависимости от контура поперечного сечения и направления ветра. Для прямоугольного контура при направлении ветра, перпендикулярном грани, $k_l = 1.0$.

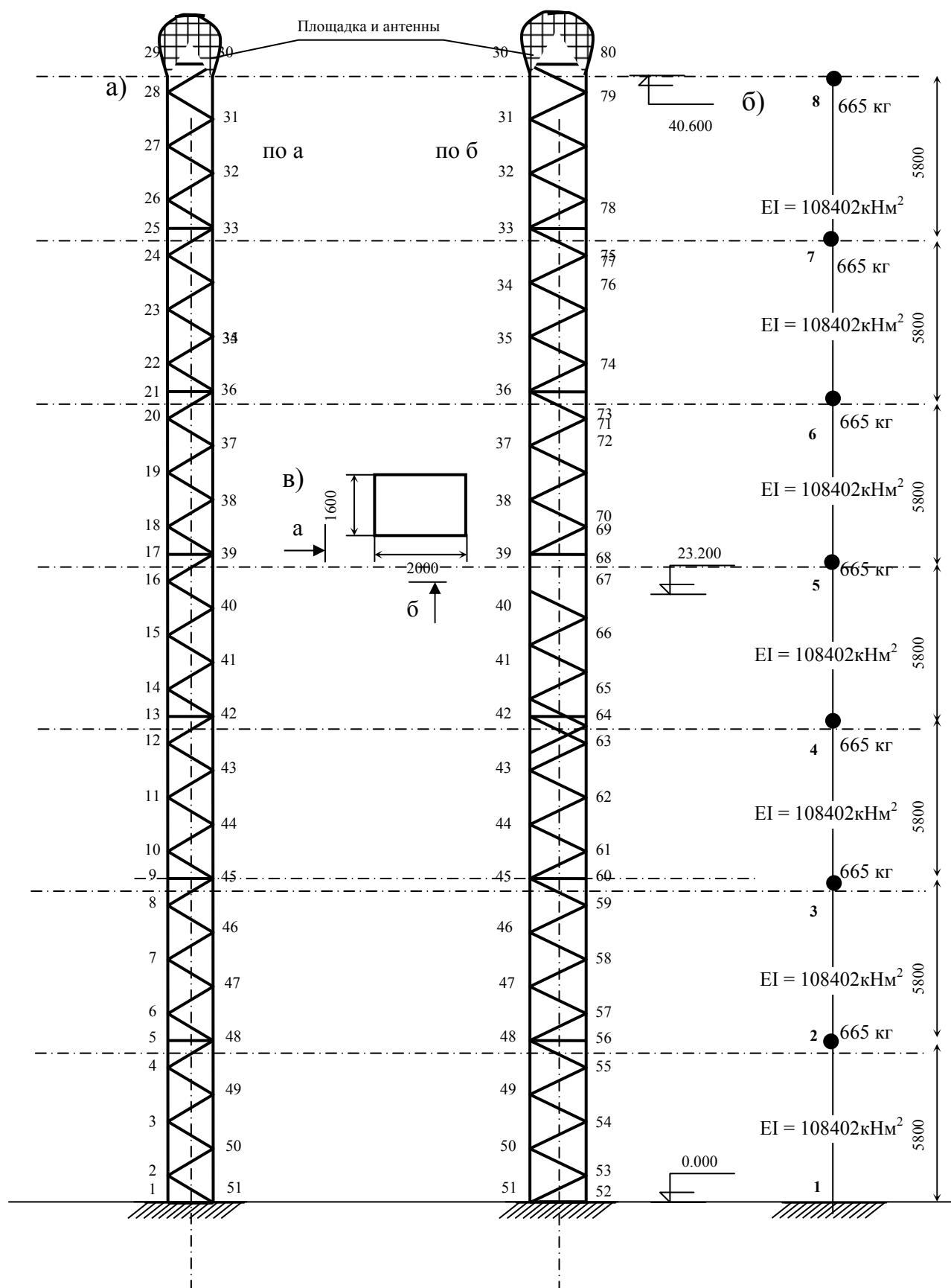


Рис. 4.5. Схема башни:

а – решётка башни, б – схема башни, в – сечение ствола башни

Расчетное значение средней (статической) составляющей нагрузки

$$S_{cm} = w_m = w_o c \gamma_f k, = 0.45 \cdot 0.45 \cdot 1.4 \cdot k = 0.3 \cdot k;$$

значения w_m в зависимости от k приведены в таблице 4.3.

Для упрощения вычисления нагрузки ферма по высоте делится на семь секций (рис. 4.5). Нагрузка на башню собирается по ее ширине в направлении, перпендикулярном потоку (2 м).

Таблица 4.3

Расчетные значения средней составляющей ветровой нагрузки

Номер узла (рис. 3.4, б)	1	2	3	4	5	6	7	8
Высота, м	0	5.8	11.6	17.4	23.2	29.0	34.8	40.6
k	0.75	0.79	1.04	1.185	1.29	1.37	1.435	1.506
w_m , кПа	0.225	0.237	0.312	0.356	0.387	0.411	0.431	0.452
$w_m^{привед}$, кН/м	0.45	0.474	0.624	0.712	0.774	0.822	0.862	0.904

2. Определение пульсационной (динамической) составляющей ветровой нагрузки

Пульсационная составляющая ветровой нагрузки зависит от ветровых воздействий и параметров собственных колебаний башни.

Для вычисления параметров собственных колебаний башня заменяется консольным стержнем с сосредоточенными массами (рис 4.5, б). Массы сосредоточиваются в середине каждой секции (масса секции равна сумме масс всех входящих в нее стержней).

Так как размеры поперечного сечения башни постоянны по высоте, жесткость консольного стержня EI будет постоянной. Модуль упругости стали $E = 210$ ГПа. При подсчете моментов инерции поперечного сечения стержня учитываем только стойки башни. Тогда момент инерции сечения, образованного четырьмя стойками, относительно оси, проходящей через центр тяжести всего сечения (рис. 4.6), определится по формуле:

$$I_x = 4 \cdot (I_{x \text{ собств}} + A \cdot a_l^2);$$

где $I_{x \text{ собств}}$ – собственный момент инерции трубчатого сечения одной стойки относительно оси, проходящей через его центр тяжести,

A - площадь поперечного сечения трубы 133 x 6, a_l - расстояние от центра тяжести трубы до центральной оси всего сечения башни.

В результате расчетов получаем значения момента инерции и жесткости консольного стержня:

$$I_x = 4 \cdot (0.0000041 + 0.002010 \cdot 0.80^2) = 0.005162 \text{ м}^4;$$

$$EI_x = 0.005162 \cdot 210 = 1.08402 \text{ ГНм}^2 = 108402 \text{ кНм}^2;$$

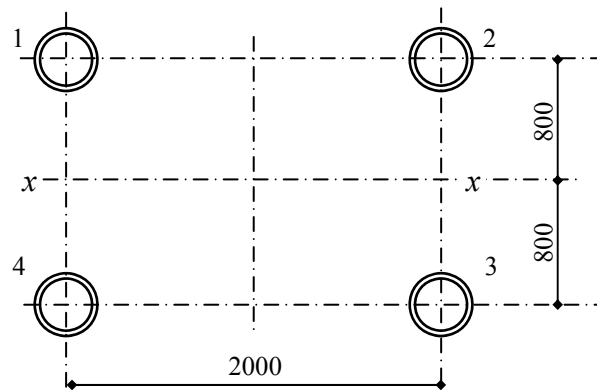


Рис. 4.6. Сечение башни

По динамической расчетной схеме определяем параметры собственных колебаний башни для первых трех форм колебаний.

Динамический расчет выполнен на ПЭВМ по программе «Динамика», составленной на кафедре Теории сооружений ДВГТУ. Полученные значения частот и периодов приведены в табл. 4.4. Формы колебаний и перемещения показаны на рис. 4.7.

Таблица 4.4

Частоты и периоды собственных колебаний башни

Форма колебаний	Круговая частота $\omega, \text{с}^{-1}$	Частота $f, \text{Гц} (\text{с}^{-1})$	Период $T, \text{с}$
1	0.057	0.010	109.524
2	0.363	0.058	17.300
3	6.128	0.976	1.025

Для вычисления пульсационной составляющей ветровой нагрузки определяем предельное значение собственной частоты башни f_l . По табл. 8 СНиП 2.01.07-85* при $\delta = 0.15$ (δ - логарифмический декремент колебаний, зависит от типа сооружения, принимается по СНиП 2.01.07-85*, п. 6.8) и нормативном значении ветрового напора $w_o = 0.45 \text{ кПа}$ (III ветровой район) $f_l = 3.8 \text{ Гц}$.

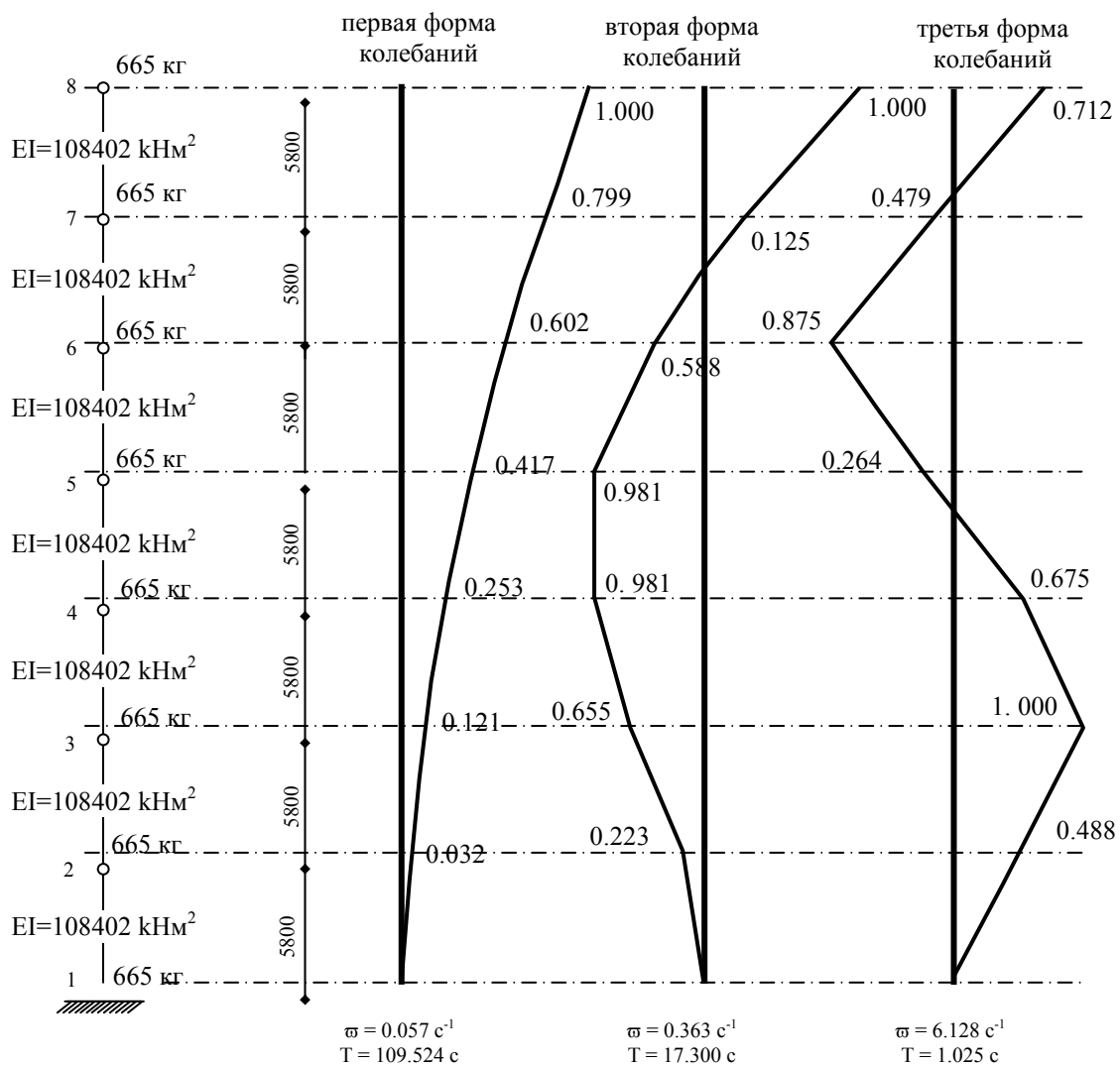


Рис. 4.7. Частоты и формы собственных колебаний башни

Так как башня имеет симметричное сечение и $f_l = 0.010 < f_l = 3.8$, пульсационная составляющая ветровой нагрузки w_p вычисляется по формуле (здесь $\eta = \psi$, а w заменен на y , чтобы исключить путаницу в обозначениях):

$$w_p = m \xi y,$$

где m - масса сооружения на уровне z , отнесенная к площади поверхности, к которой приложена ветровая нагрузка;

ξ - коэффициент динамичности, определяемый по СНиП 2.01.07-85* в зависимости от параметра $\xi = \sqrt{(\gamma w_0)/(940 f_l)}$ и логарифмического декремента колебаний δ :

$$\xi = \frac{\sqrt{1.4 \cdot 0.45}}{940 \cdot 0.010} = 0.085;$$

$\delta = 0.15$ (п. 6.8 СНиП 2.01.07 – 85*);

$\xi = 2.30$ (п. 6.7 СНиП 2.01.07 – 85*);

y – горизонтальное перемещение сооружения на уровне z по первой форме собственных колебаний;

ψ – коэффициент, определяемый для каждого k - того участка, в пределах которого ветровая нагрузка принимается постоянной по формуле

$$\psi = \sum y_k w_{pk} / \sum y_k^2 M_k,$$

где M_k – масса k -того участка,

y_k – горизонтальное перемещение k -того участка,

w_{pk} – равнодействующая пульсационной составляющей ветровой нагрузки для k - того участка, определяемая по формуле:

$$w_{pk} = w_m \zeta \nu,$$

где $w_m = w_{окс}$ – нормативная составляющая статической ветровой нагрузки,

ζ – коэффициент пульсаций давления ветра на уровне z , принимаемый по табл. 7 СНиП 2.01.07-85*;

ν – коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра.

В соответствии с приведенными формулами вычисляется пульсационная составляющая ветровой нагрузки, действующая на один квадратный метр вертикальной поверхности. Вычисления по высоте башни приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Пульсационная составляющая ветровой нагрузки

Номер узла	m, кН	m /S _{поверхн} , кПа	ξ	ψy	w_p , кПа
2	6.65	0.574	2.3	0.046	0.061
3	6.65	0.574	2.3	0.173	0.228
4	6.65	0.574	2.3	0.362	0.478
5	6.65	0.574	2.3	0.597	0.788
6	6.65	0.574	2.3	0.861	1.137
7	6.65	0.574	2.3	1.142	1.508
8	6.65	0.574	2.3	1.429	1.887

3. Определение суммарной ветровой нагрузки на башню

С учетом вычисленных значений w_m и w_p , суммарная ветровая нагрузка равна:

$$w = w_m + w_p.$$

Значения суммарной ветровой нагрузки на башню для каждой секции с учетом направления ветра перпендикулярно боковой грани башни приведены в табл. 4.6, расчетная схема башни - на рис. 4.8.

Таблица 4.6

Суммарная ветровая нагрузка

Номер узла	$w_m, \text{кПа}$	$w_p, \text{кПа}$	$w, \text{кПа}$	$w_{\text{привед}}, \text{кН/м}$
1	0.225	0	0.225	0.450
2	0.237	0.061	0.298	0.596
3	0.312	0.228	0.540	1.080
4	0.356	0.478	0.834	1.668
5	0.387	0.788	1.175	2.350
6	0.411	1.137	1.548	3.096
7	0.431	1.508	1.939	3.878
8	0.452	1.887	2.339	4.678

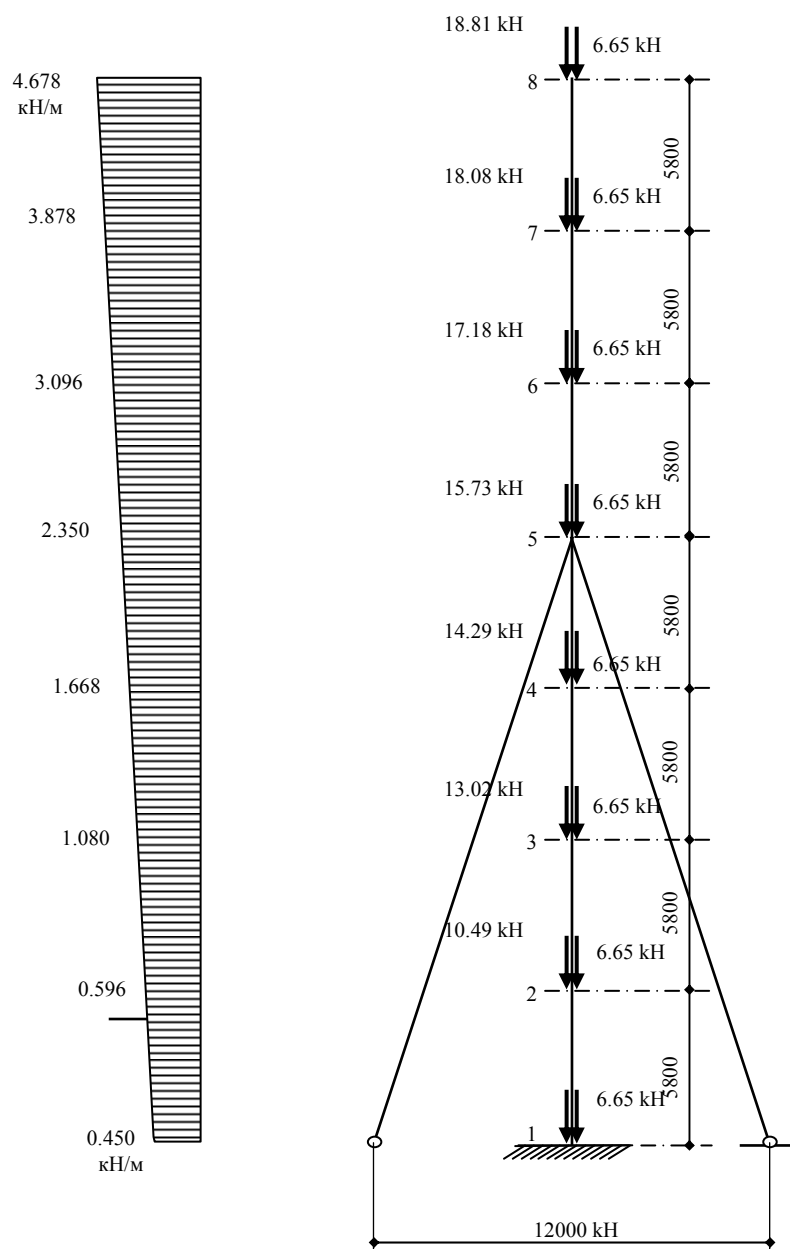


Рис. 4.8. Расчетная схема башни