

О квазистатической составляющей реакции сооружений на порывы ветра

Б. В. ОСТРОУМОВ,
зав. отделом высотных сооружений, д-р техн. наук,
лауреат Государственной премии, засл. строитель РФ
М. А. ГУСЕВ, канд. физ.-мат. наук
(ЦНИИПСК им. Мельникова)

На сооружения, находящиеся в ветровом потоке, действуют порывы ветра, энергетический спектр которых представлен на рис. 1 [1, 2].

Из рисунка следует, что максимум энергии порывов приходится на диапазон частот от 0,1 до 0,01 Гц, в то время как частоты собственных колебаний современных сооружений лежат в диапазоне от 10 до 0,1 Гц, где энергия порывов относительно невелика [3–5]. Далее будем называть этот диапазон частот резонансным в отличие от квазистатического (низкочастотного) диапазона, соответствующего частотам максимума спектра энергии порывов ветра. Название «квазистатический» основано на том, что в этом диапазоне частот коэффициент динамичности сооружений часто принимают равным единице, поскольку он в действительности близок к единице.

Сила, действующая на сооружение при воздействии порыва ветра, пропорциональна изменению скорости ветра в порыве V^1 и коэффициенту пространственной корреляции $K_{\text{кор}}$, учитывающему степень синхронности воздействия порывов по площади сооружения, т. е.

$$P = KV^1(n)K_{\text{кор}}(n), \quad (1)$$

где K — коэффициент пропорциональности, который для одного и того же сооружения не зависит от частоты порыва ветра n .

Рассмотрим зависимости величин V^1 и $K_{\text{кор}}$ от частоты порыва ветра.

В таблице представлены амплитудные значения пульсаций скорости ветра V^1 в порыве в зависимости от частоты порыва n .

Амплитуду пульсаций скорости ветра определяли по формуле из [6]

$$A_{V^1}(n) = \sqrt{\frac{Sv'(n)k\bar{V}\Delta n}{n}}, \quad (2)$$



Б. В. ОСТРОУМОВ

где $Sv'(n)$ — ординаты спектра пульсаций скорости ветра (порывов ветра) Давенпорта [2, 3]; k — коэффициент шероховатости местности (значения даны в [2–6]); \bar{V} — средняя скорость ветра; n — частота; Δn — ширина полосы компоненты турбулентности (порыва ветра).

График спектра пульсаций скоро-

сти (порывов ветра) представлен на рис. 1 так, что площадь под кривой между двумя какими-либо частотами пропорциональна среднеквадратичной величине этой компоненты скорости, поэтому здесь используется ширина полосы.

Ширину полосы компоненты турбулентности Δn находили по формуле из [6]

$$\Delta n = \gamma n, \quad (3)$$

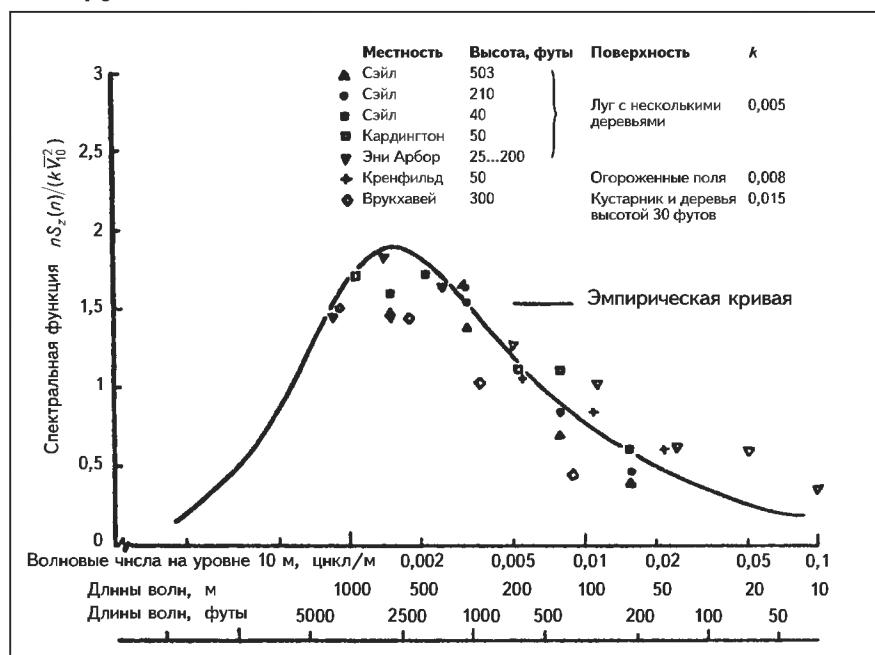
где γ — отношение критического демпфирования, принимаемое $\gamma = \delta/2\pi$ (здесь δ — логарифмический декремент колебаний сооружения [3, 7]).

Из данных таблицы следует, что в низкочастотном (квазистатическом) диапазоне спектра порывов ветра амплитудные значения пульсаций скорости почти на порядок превышают пульсации скорости (V^1) в диапазоне резонансных частот колебаний сооружений.

Пространственная корреляция воздействия порывов ветра определяется размером турбулентных вихрей, т. е. синхронностью их воздействия по площади сооружения.

Размеры турбулентных образований (вихрей) в квазистатической области спектра (см. рис. 1) достигают 500–1000 м, в то время как в резонансной области частот они не превышают 10–20 м.

Рис. 1. Энергетический спектр порывов ветра, действующих на сооружения



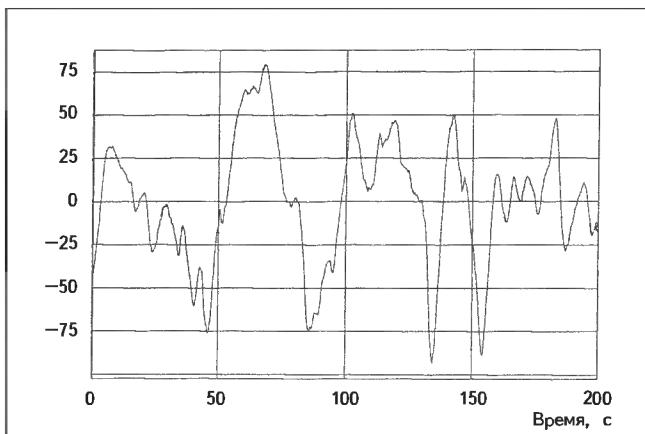


Рис. 2. Временная развертка колебаний шпиля высотного здания «Триумф-палас» в Москве

Амплитудные значения пульсаций скорости ветрового потока в зависимости от частоты порывов ветра для трех ветровых районов (по СНиП 2.01.07-85*)

Ветровой район	Значения V^1 , м/с, при частоте порывов ветра, Гц										
	0,01	0,03	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	3	5	10
1-й	1,4	1	0,69	0,45	0,36	0,28	0,2	0,19	0,18	0,15	0,14
4-й	2	1,5	1,12	0,79	0,65	0,53	0,32	0,3	0,28	0,23	0,22
7-й	2,6	2,2	1,64	1,16	0,94	0,67	0,48	0,46	0,43	0,36	0,32

Таким образом, в квазистатической зоне размеры турбулентных вихрей соизмеримы с размерами сооружения, вследствие чего пульсационная нагрузка воздействует синхронно по площади сооружения, т. е. коэффициент пространственной корреляции близок к единице ($K_{\text{кор}} = 1$).

На резонансных частотах размеры турбулентных вихрей значительно меньше геометрических размеров сооружений. Поэтому их воздействие в значительной степени взаимо компенсируется [3, 7] и $K_{\text{кор}} = 0$.

Принимая на высоких (резонансных) частотах $K_{\text{кор}} = 0,1$, получаем, что в квазистатическом диапазоне частот пространственная корреляция порывов ветра на порядок больше, чем в диапазоне резонансных частот колебаний сооружений.

На основании выражения (1) можно сделать вывод о том, что пульсационная сила, действующая на сооружение на квазистатических частотах порывов ветра, приблизительно на два порядка больше, чем на резонансных частотах сооружений. Соответственно и реакция сооружений

(перемещения, усилия, напряжения) на порывы ветра в квазистатическом диапазоне частот должна существенно превышать реакцию на высоких (резонансных) частотах.

Для проверки результатов теоретического анализа с помощью специальной аппаратуры, разработанной в ЦНИИПСК им. Мельникова, были проведены измерения на натурных сооружениях: шпиле высотного здания «Трумф-палас» в Москве (высота 267 м) и 201-метровой радиотелевизионной башне в Самаре.

На рис. 2 и 3 приведены результаты измерений — временные развертки колебаний указанных сооружений. Из рисунков следует, что сооружения совершают низкочастотные (квазистатические) колебания, на которые накладываются высокочастотные колебания с частотами, близкими к резонансным. При этом оценки амплитуд колебаний показали, что они у обоих сооружений на квазистатических частотах достигают около 30 см, в то время как на высоких частотах амплитуды колебаний не превышают 1 см, составляя, как правило, доли миллиметра.

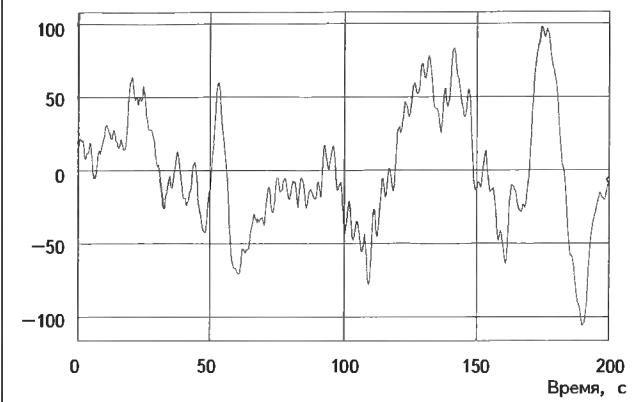


Рис. 3. Временная развертка колебаний радиотелевизионной башни в Самаре

Таким образом, результаты теоретических и экспериментальных исследований квазистатической и резонансной составляющих реакции сооружений на порывы ветра хорошо согласуются.

Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования квазистатической составляющей реакции сооружений на порывы ветра могут привести к разработке новой редакции СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и Воздействия» в части определения ветровых нагрузок на сооружения, что позволит существенно уточнить расчет сооружений на усталостную прочность и долговечность [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Остроумов Б. В. Исследования, разработка и внедрение высотных сооружений с гасителями колебаний: Автореф. дис... д-ра техн. наук. М., 2003.
2. Davenport A. G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. London: Proc. Y.C.E., 1961.
3. Davenport A. G. Gust loading factors // J. of the structural division Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1967. June.
4. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия.
5. Остроумов Б. В., Зилитинкевич С. С. Об оценке ветровых нагрузок на высотные сооружения// Метеорология и гидрология. 1967. № 6.
6. Macdonald A. J / Wind loading on Buildings. London, 1975.
7. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. М.: Стройиздат, 1978.