

УДК 624.04:519.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВЫСОТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Шейн Александр Иванович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика».

Кузнецов Александр Николаевич,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

аспирант кафедры «Механика».

Чуманов Александр Васильевич,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

магистрант кафедры «Механика».

Аннотация

В работе предложен способ моделирования ветровых воздействий на высотные здания и сооружения. В основе метода лежит представление вектора ветровых узловых нагрузок в виде системы функций, описывающих возможные изменения давления ветра на границах сооружения. При этом ветровое давление на высоте измерений аппроксимируется по велосиграмме. Предлагаемый подход позволяет моделировать несколько видов ветровых воздействий.

Ключевые слова: ветер, скорость ветра, ветровое давление, велосиграмма ветра, вектор узловых воздействий.

MODELING OF WIND EFFECTS ON HIGH RISE BUILDINGS

Shein Alexander Ivanovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the department “Mechanics”.

Kuznetsov Alexander Nikolaevich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Post-graduate student of the department “Mechanics”.

Chumanov Alexander Vasilevich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Undergraduate of the department “Mechanics”.

Abstract

Proposed method simulation of wind impact on high-rise buildings. The method is based on representation of the wind vector of nodal loads in the form of functions describing possible changes of the wind pressure on the borders of the structure. Thus the wind pressure at the height of the measurements is approximated by velochrome. The proposed approach allows to model several types of wind impact.

Keywords: wind, wind speed, wind pressure, wind velocigrams, the vector of nodal impacts.

В настоящее время свод правил по проектированию и строительству [1] предлагает при расчете зданий и сооружений учитывать несколько видов воздействия ветра: 1) основной тип ветровой нагрузки; 2) пиковые значения ветровой нагрузки; 3) резонансное вихревое возбуждение; 4) аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования, дивергенции и флаттера. Наличие этого достаточно большого перечня ветровых воздействий преследует цель не пропустить в расчетах на ветер какой-либо фактор, способный вызвать перенапряжение в сечениях механической системы. При этом все эти расчеты, по сути, являются отдельными фрагментами полноценной динамической модели ветрового воздействия.

Что же должна представлять собой полноценная математическая модель ветрового воздействия? Известно, что в практике проектирования уникальных

зданий в сейсмических районах хорошо зарекомендовали себя динамические расчеты сооружений на основе трехмерных акселерограмм землетрясений. Эти акселерограммы могут быть как записями фактически произошедших землетрясений, так и синтезированными функциями зависимости ускорений основания от времени. При этом внешние воздействия на сооружение сводятся к совокупности переносных сил инерции узловых масс, изменяющихся соответственно этим фактическим или синтезированным акселерограммам [3-8]. Аналогичным образом можно смоделировать и ветровые воздействия. Некоторые приемы аналитической аппроксимации ветровых воздействий изложены в [10-11].

Рассмотрим подробнее ветровой поток, действующий на сооружение. Прежде всего, этот поток имеет определенное, преимущественно горизонтальное, направление с небольшими поворотами в горизонтальных плоскостях. Поток характеризуется переменной по величине, по направлению и по высоте интенсивностью. Вертикальный градиент скорости ветра связан с убыванием влияния силы трения по высоте и создает параболическое увеличение давления с увеличением высоты. Горизонтальный градиент ветра, обычно связанный с влиянием соседних локальных объектов, может способствовать крутильным колебаниям сооружения. Переменность величины интенсивности давления ветрового потока на данной площадке связана с пульсациями величины скорости ветра. При этом наиболее опасным свойством пульсаций является их повторяемость. В совокупности вектор ветровых узловых нагрузок должен представлять собой систему функций, описывающих возможные изменения давления ветра на границах сооружения.

Ветровое давление на грузовой площадке i -ого узла, в которое преобразуется определенная часть ветрового потока, можно вычислить по формуле:

$$q_i = \frac{1}{2} \rho \cdot V_i^2 \cdot C_i, \quad (1)$$

где долю скоростного напора, которая переходит в ветровое давление, определяет аэродинамический коэффициент C_i , а V_i – скорость ветра вблизи сооружения. При назначении аэродинамических коэффициентов будем основываться на итоге многолетних исследований, изложенных в [1]. Скорость ветрового потока удобно представить в виде суммы средней и пульсационной составляющих скорости:

$$V_i = V_{i,c} + V_{i,\pi} \quad (2)$$

При этом динамический характер ветрового воздействия, повторяемость силовых воздействий, определяется именно пульсационной составляющей скорости.

Подставляя сумму скоростей в (1), получим

$$q_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i \cdot (V_{i,c}^2 + 2V_{i,c}V_{i,\pi} + V_{i,\pi}^2), \quad (3)$$

или

$$q_i = q_{i,0} + q_{i,\pi} \quad (4)$$

Здесь

$$q_{i,0} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i \cdot V_{i,c}^2, \quad (5)$$

$$q_{i,\pi} = \rho \cdot C_i \cdot V_{i,c} \cdot V_{i,\pi} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i \cdot V_{i,\pi}^2 \quad (6)$$

где q_0 – статическое или среднее давление,

q_π – пульсационное давление.

Если предположить, что направление (прямая) вектора скорости ветра на данном участке местности в течение некоторого промежутка времени постоянно, то можно замерить и записать экстремальные изменения скорости ветра во времени. Эта запись изменения функции скорости от времени может быть задана таблично или в виде графика (рисунок 1).

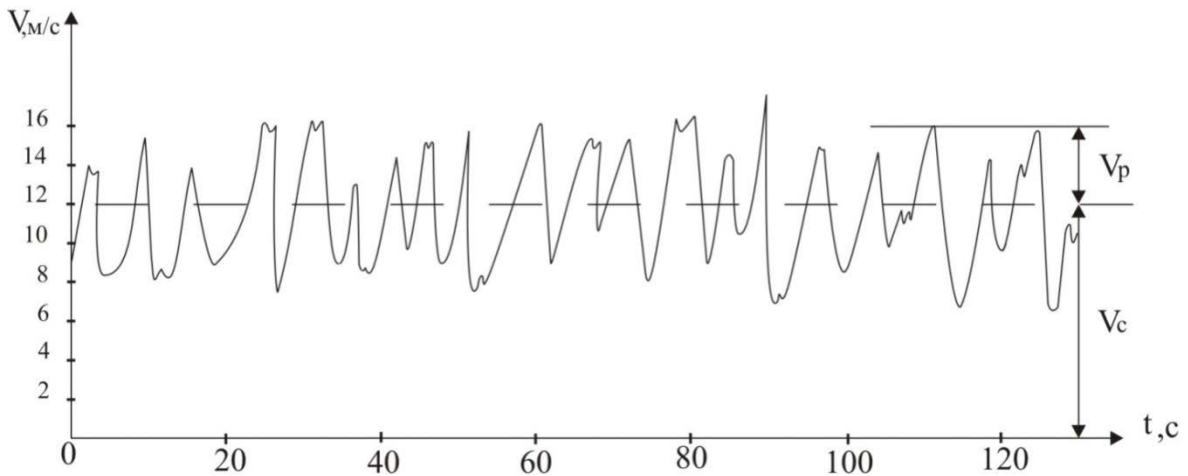


Рисунок 1 – Велосиграмма ветра

Эти велосиграммы можно целенаправленно в разумных пределах обработать для моделирования резонансного вихревого возбуждения. Для этого необходимо обеспечить повторяемость ветровых пульсаций близкую к частотам собственных колебаний здания или сооружения.

При численной реализации задачи динамики прямыми методами требуется использовать весьма малые шаги по времени. Поэтому при описании функции пульсационной составляющей скорости V_{Π} используем кусочно-полиномиальную интерполяцию. Для этого разобьем временной интервал ветрового воздействия на одинаковые отрезки и на каждом отрезке малой длины заменим исходную функцию многочленом невысокой степени. Обычно эту аппроксимацию выполняют либо кусочно-линейными участками, либо кубическими сплайнами. В программных комплексах MATLAB и MathCad сплайн-интерполяция осуществляется по табличным значениям функции при помощи специальных операторов.

Зависимость скорости ветра от высоты определяется степенной функцией

$$V_{i,c} = V_0 \left(\frac{h_i}{h_0} \right)^k, \quad (7)$$

где $V_{i,c}$ – средняя скорость ветра на высоте i -ого яруса; V_0 – скорость ветра на высоте измерений; h_i – высота здания на уровне i -ого яруса; h_0 – высота

измерения; k – экспериментальный показатель шероховатости местности (0,12-0,44).

Изменение направления пульсирующей составляющей ветрового потока в горизонтальной плоскости в виде колебаний потока в некотором секторе можно промоделировать путем разложения динамической составляющей по двум взаимно-перпендикулярным направлениям этой плоскости. Т.е. вектор узловых воздействий будет иметь две составляющих.

Возможные срывы воздушных потоков и возникновение галопирования можно смоделировать поочередным обнулением части краевых узловых векторов ветровых воздействий с частотой собственных колебаний здания в направлении предполагаемого галопирования.

При задании параметров векторов ветровых воздействий необходимо помнить, что приближенная эмпирическая оценка частоты основного тона собственных колебаний для высотных зданий осуществляется по формуле

$$\omega_1 = \frac{46}{h}, \quad (8)$$

где h – высота здания. Отсюда наиболее опасными будут колебания скорости ветра с периодом примерно равным

$$T = \frac{\pi h}{23}. \quad (9)$$

При задании знакопеременного горизонтального градиента необходимо учитывать, что крутильной формой колебаний высоток обычно является третья (реже четвертая) собственная форма. Задание частоты изменения горизонтального ветрового давления соответственно третьей (крутильной) собственной частоте определяет методику моделирования крутильных колебаний и расчета сооружений на кручение при ветре. Изменение векторов ветрового давления в плоскости можно связать с колебаниями горизонтальной прямой вокруг центра вращения с частотой ω_3 . При этом узловые пульсирующие нагрузки i -ого яруса могут вычисляться по формуле

$$P_{ij}^p = P_{ij}^0 + \delta_i P_{ij}^0 \frac{X_{ij}}{\Delta X_i} \sin(\omega_3 t) \quad (10)$$

где δ_i – максимальная доля приращения ветрового напора в плоскости i -ого яруса, X_{ij} – координата j -ого узла i -ого яруса, ΔX_i – среднее расстояние между узлами яруса, ω_3 – угловая скорость вращения, соответствующая собственным крутильным колебаниям сооружения. Т.е. геометрические места концов векторов нагрузок данного уровня здания для данного момента времени представляют прямую линию.

Таким образом, ветровую нагрузку на сооружение удобно смоделировать в виде узловых сосредоточенных воздействий как функций скорости ветра от времени, высоты и сектора колебаний ветрового потока. Кроме того, горизонтальное распределение ветровых воздействий в виде (10) и периодических краевых нулей позволит промоделировать закручивание и галопирование сооружения.

Библиографический список:

1. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М., 2011.
2. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1984. 358 с.
3. Шеин А.И. Математическое моделирование механических систем на примере задачи гашения колебаний высотных сооружений [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2015. №1. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no1/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/matematicheskoe-modelirovanie-mehanichestskih-sistem-na-primere-zadachi-gasheniya-kolebanii-vysotnyh-sooruzhenii/at_download/file.
4. Шеин А.И., Шмелев Д.А. Оценка эффективности активного жидкостного гасителя колебаний высотных сооружений при нестационарных

воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. №1(252). С. 59-63.

5. Шеин А.И., Бакушев С.В., Зайцев М.Б., Земцова О.Г. Гашение колебаний высотных сооружений: в 3-х ч. Ч.1. Современное состояние проблемы : монография. Пенза: ПГУАС, 2011г. 235с.

6. Шеин А.И. Метод сеточной аппроксимации элементов в задачах строительной механики нелинейных стержневых систем: монография. Пенза, 2005. 248 с.

7. Шеин А.И. Решение многопараметрической задачи динамики стержневых систем методом сеточной аппроксимации элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 2. С. 27.

8. Шеин А.И., Зайцев М.Б. Метод смещенных разностей для решения систем дифференциальных уравнений движения механических систем // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. №2. С. 38-41.

9. Шеин А.И., Земцова О.Г. Схемы и теория гасителей пространственных колебаний сооружений // Региональная архитектура и строительство. 2010. №1. С. 45-52.

10. Шеин А.И., Земцова О.Г. Снижение уровня колебаний системы «упругое основание – высотное сооружение» с помощью нелинейного динамического гасителя // Региональная архитектура и строительство. 2011. №2. С. 83-90.

11. Земцова О.Г., Шеин А.И., Бочкарев Р.В. Ветровые нагрузки на сооружения в виде давления переменного ветрового потока // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 11 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/11/40138>.