

УДК 624.042.4

Расчет ветровых нагрузок на конструкции в условиях городской застройки

Горохов Е.В., д.т.н., Кузнецов С.Г., к.т.н., Васылев В.Н., к.т.н.

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
Украина

Анотація. Приводяться результати визначення вітрових впливів на висотні будівлі. Для чисельного вирішення сформульованої задачі за основу береться метод розщеплювання.

Аннотация. Приводятся результаты определения ветровых воздействий на высотные здания. Для численного решения сформулированной задачи в качестве основы берется метод расщепления.

Abstract. The results of determination of the wind influences acting on high-rise buildings are given. The breaking up method is accepted as a basis for numerical solution of the formulated task.

Ключевые слова: ветровой поток, ветровая загрузка, система уравнений Навье-Стокса, волна.

Введение. Строительство высотных зданий и сооружений является основной тенденцией развития городов. Одной из причин, которые тормозят развитие высотного строительства в Украине, является отсутствие современной нормативной базы, учитывающей аэродинамические особенности, возникающие при обтекании ветровым потоком высотных сооружений. Часто не учитывают последствия взаимодействия нескольких высотных зданий и сооружений, расположенных на различном расстоянии одно от другого, в частности, возникновение отрывных течений, генерации подветренных волн и их взаимодействие.

Все это говорит о необходимости натурных, модельных и теоретических исследований как важного этапа во время проектирования и расчета конструкций, чувствительных к действию ветра. Благодаря развитию вычислительной техники численное моделирование стало важным звеном исследований по данной проблематике.

Расчет обтекания ветровым потоком высотных зданий необходим как для определения ветровых нагрузок на конструкции здания, так и для учета влияния ветра на воздухообмен помещений. В первом случае основной интерес представляют сильные кратковременные ветра (скорость потока 20–35 м/с), во втором – слабые квазистационарные со скоростью потока на уровне 5 м/с. В настоящее время в практике проектирования используются

методики, которые позволяют проводить оценку ветровых нагрузок на здания [1–3]. Однако возможность применения этих методик при проектировании современных высотных зданий, особенно если они имеют сложную геометрическую форму, вызывает вопросы, поскольку методики базируются, в основном, на опыте проектирования зданий малой и средней высоты довольно простой формы [1, 2].

Необходимая информация о распределении ветровых нагрузок на высотные сооружения сложной конфигурации может быть получена с помощью методов физического (в аэродинамических трубах [1, 3]) или математического (компьютерного) моделирования [4 – 6]. И в том, и в другом методе имеется ряд проблем адекватного моделирования природных явлений.

При проектировании высотных сооружений очень важно получить детальную картину обтекания их ветром. Для крупных объектов сложной формы и с учетом ветрового профиля (нарастания скорости ветра с высотой) это задача в полном объеме не решается даже современными вычислительными средствами. Именно поэтому в мировой практике высотного строительства принята стратегия определения ветровых воздействий в два этапа: оценочного расчета воздействий и испытаний макета в аэродинамической трубе с оснащением его датчиками для статических и динамических измерений. Расчеты должны быть основаны на результатах аэродинамических испытаний макетов (кроме одиночно стоящих высотных зданий простой формы). За рубежом используют трубы разных конструкций и размеров, при этом считается, что испытания крупномасштабных моделей дают более детальную и точную картину ветрового воздействия. Важным моментом испытаний макетов является создание вертикального ветрового профиля. Взаимодействие атмосферных потоков с поверхностью Земли даже при минимальном рельефе «тормозит» ветер вниз, при этом образуются внутренние вихри разных размеров. Известно, что с середины высоты для высотных зданий 40 % ветрового потока, набегающего на здание, движется вниз. Образуются вихревые структуры, размер которых зависит от конфигурации сооружения. При этом создаются локальные добавочные нагрузки (в первую очередь на фасад здания), причем с наветренной стороны на уровне входа в высотное здание ветровые нагрузки могут быть подобны или даже больше, чем на высоте 100 м.

Физическая модель подветренных волн. Анализ нынешнего состояния вопроса и научных достижений в области возникновения явлений волновой природы показал, что волны, возникающие при обтекании высотных сооружений, идентичны так называемым «корабельным» волнам. Данное приближение позволяет рассчитать характеристики

возникающих ветровых волн в зависимости от размеров высотного здания и свойств набегающего ветрового потока.

Так как расчет обтекания трехмерных препятствий крайне сложен, основные особенности таких течений продемонстрированы на простейшем примере, встречающемся в природе. С этой целью рассмотрим волны за источником возмущений, каким является, например, судно, движущееся по поверхности глубокой воды. Вся структура возникающих при этом волн остается неподвижной относительно судна и может рассматриваться как подветренные волны. Скорость волн на глубокой воде U определяется выражением (1) и если линейное возмущение составляет с нормалью к направлению движения угол φ , то поперечная составляющая $U \cos \varphi$ создает волны. Продольную составляющую скорости можно добавить после того, как форма волновой структуры найдена. Если подветренные волны пропорциональны $\sin kx$, где x – расстояние, отсчитываемое вниз по потоку в направлении перпендикуляра к линейному препятствию (рис. 1), то для точки P с полярными координатами r, θ из определения X и уравнения (1) получим следующие два уравнения (2):

$$U^2 = \frac{g}{k}, \quad (1)$$

$$X = r \cos(\varphi + \theta), \quad k = \frac{g}{U^2 \cos^2 \varphi}. \quad (2)$$

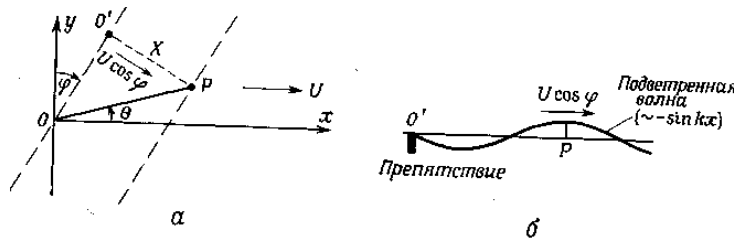


Рис. 1. Система координат (а) и подветренная волна в вертикальной плоскости за препятствием (б)

Волна в точке P , параллельной линейному препятствию OO' , составляет с нормалью к набегающему потоку угол φ . Набор линейных препятствий с разными углами φ образует в точке O изолированное препятствие. Подветренные волны получают суммированием отдельных подветренных волн. Справа показана элементарная подветренная волна в вертикальной плоскости, проведенной через $O'P$.

Наиболее интересной чертой волновой картины, показанной на рис. 2, является то, что она заключена между двумя значениями θ . Так максимальный угол раствора равен: $\operatorname{tg} \theta_{\max} = 2^{-3/2}$, или $|\theta_{\max}| = 19^\circ 28'$.

Другие линии постоянной фазы имеют аналогичную форму. Точка M , в которой расходящиеся линии постоянной фазы пересекают такие же поперечные линии, соответствует максимуму амплитуды волны. Иногда достигается второй максимум в точке N , но его не следует путать (в случае корабля) с гребнями волн типа M , создаваемых кормой корабля. Поперечные волны в точках L велики, однако для хорошо спроектированного корабля, идущего с расчетной скоростью, суммарное возмущение, создаваемое главным образом его носом и кормой, здесь минимально, и этим обеспечивается минимум волнового сопротивления.

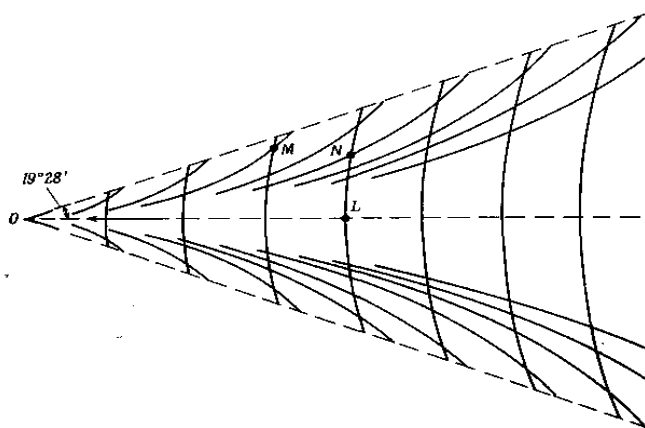


Рис. 2. Линии гребней суммарной структуры подветренных волн за возмущением с центром в точке O , движущимся по поверхности глубокой волны

Все фазовые линии волновой картины имеют одинаковую форму и получаются при последовательных значениях N , которые увеличиваются на 2π при переходе от одного гребня к другому.

Основы модельных экспериментов. Полученные формулы имеют простой вид благодаря простоте уравнения (1), которое связывает длину волны со скоростью на глубокой воде.

Одной из причин, вызывающих большие подветренные волны, является наличие нескольких параллельных групп препятствий, удаленных друг от друга на целое число длин подветренных волн. Амплитуда волны может удваиваться вторым препятствием, находящимся на расстоянии длины волны вниз по потоку от первого.

Точно так же второе препятствие, если поместить его вниз по потоку на расстоянии, равном нечетному числу полуволн, может полностью погасить подветренные волны, созданные первым препятствием. В общем случае второе препятствие просто меняет фазу подветренных волн.

Проведено физико-математическое моделирование обтекания высотного сооружения и группы сооружений путем решения полной системы уравнений Навье-Стокса в двумерной и трехмерной постановке. В данных расчетах были определены коэффициенты лобового сопротивления здания и группы зданий в зависимости от их взаимного расположения и угла атаки.

Система расчетных уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{R_e} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{R_e} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right),\end{aligned}\quad (3)$$

где $R_e = \frac{U \cdot b}{\nu}$ – число Рейнольдса.

Для удовлетворения граничных условий на препятствии применим метод фиктивных областей с продолжением по младшим коэффициентам в расширенной области $D_0 \cup D$. Запишем вспомогательную задачу для системы уравнений (1 и 2):

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - S \cdot (u - u_0), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - S \cdot (w - w_0),\end{aligned}\quad (4)$$

где $S(x, z) = \begin{cases} 0, & (x, z) \in D \\ \varepsilon^{-2}, & (x, z) \in D_0 \end{cases}$, ε – малый параметр,

u_0, w_0, T_0 – значения составляющих скорости ветра и температуры на нижней границе.

Для численного решения сформулированной задачи в качестве основы был взят метод расщепления. Для аппроксимации конвективных членов использованы разности против потока, что приводит к повышению устойчивости расчетного алгоритма для более высоких чисел Рейнольдса.

Пусть в некоторый момент времени $t_n = n\tau$ (τ – шаг по времени, n – число шагов) известны поля скорости $V=(u, w)$ и давления. Тогда процедуру определения неизвестных функций в момент времени $t_{n+1} = (n+1)\tau$ организуем в виде трехэтапной схемы расщепления.

На первом этапе определим промежуточные значения скорости, температуры и концентрации по уравнениям

$$\begin{aligned}\frac{\tilde{u} - u}{\tau} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{R_e} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - S \cdot (u - u_0), \\ \frac{\tilde{w} - w}{\tau} &= -u \frac{\partial w}{\partial x} - w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{R_e} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - S \cdot (w - w_0).\end{aligned}\quad (5)$$

На втором этапе по вычисленным на первом этапе промежуточным значениям скорости выполним расчет поля давления по уравнению Пуассона:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \right).\quad (6)$$

На третьем этапе определим окончательные (на временном слое $n+1$) значения скорости по уравнениям:

$$\frac{u - \tilde{u}}{\tau} = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad \frac{w - \tilde{w}}{\tau} = \frac{\partial P}{\partial z}.\quad (7)$$

Выводы

Результаты расчетов показывают наличие образования волн за сооружениями и, в некоторых случаях, возникновение картины течения аналогичной интерференции электромагнитных волн.

Наблюдаются области со значительным увеличением модуля скорости, что косвенным образом свидетельствует о возникновении интерференции образующихся при обтекании строений подветренных волн. Эффект интерференции проявляется из-за того, что разность хода образующихся волн за первым и вторым строением кратна целому числу длин волн. Данный эффект проявляется на значительном удалении от строений (порядка 7–10 калибров), что в значительной мере может влиять на обтекание далеко стоящих строений.

Следует также отметить, что в турбулентном режиме обтекания длинные подветренные волны не возникают, что связано с особенностями отрыва пограничного слоя.

Литература

- [1] *Реттер Э.И.* Архитектурно-строительная аэродинамика. – М., 1984.
- [2] ДБН В.1.2-2:2006 Нагрузки и воздействия (нормы проектирования), К.: Минстрой Украины, 2006, С. 25 – 34.
- [3] МГСН 4.19–05. Многофункциональные высотные здания и комплексы.
- [4] American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures. ANSI/ASCE 7–95, ASCE. New York, 1998.
- [5] *Горохов Е.В., Кузнецов С.Г., Васылев В.Н.* Эффект подветренных волн при определении ветровых нагрузок // Современные строительные конструкции из металла и древесины. Сборник научных трудов. Ч. 1. – Одесса: ОГАСА, 2008. С. 36 – 41.
- [6] *Кузнецов С.Г.* Чисельне моделювання вітрових навантажень висотних будівель // Міжвузівський збірник. Наукові нотатки. – Луцьк: Луцький державний технічний університет, 2008. С. 168 – 173.

Надійшла до редколегії 24.07.2008 р.