



ЗМІНИ СТАТИЧНИХ ВІТРОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА БУДИНКИ ПІД ВПЛИВОМ ВІТРОВИХ ХВИЛЬ

С. Г. Кузнецов, Г. О. Назаров, Е. О. Лозинський

Донбаська національна академія будівництва й архітектури,

вул. Державіна 2, Макіївка, Україна, 86123.

e-mail: gregory_nazarov@mail.ru

Отримана 10 березня 2010; прийнята 26 березня 2010.

Анотація. Стаття присвячена вивченню підвітряних хвиль у забудові з висотними будинками, що володіють властивостями інтерференційного ефекту хвильоутворення, який може привести до багаторазового збільшення вітрового навантаження, що не враховується будівельними нормами. У роботі розглянуто характеристики підвітряних хвиль залежно від стану атмосфери й розмірів джерела хвильоутворення, геометричних розмірів області, де хвильові навантаження є істотними і можливе посилення коливань, оцінений перенос енергії підвітряними хвилями з урахуванням ефектів дисипації й загасання. Отримано результати розрахунків полів виникаючих підвітряних хвиль на прикладі ситуації двох висотних будинків, де визначений характер розподілу хвиль і виникаючі із цим вітрові тиски. Величина додаткового тиску залежить від геометричних розмірів будинків і їхнього взаємного розташування. Взаємодія підвітряних хвиль приводить до виникнення інтерференційної картини і, як наслідок, до локального збільшення хвильового тиску. Введено нове поняття – коефіцієнт інтерференції, що дозволяє оцінювати силу вітру, яка діє на будинки в умовах забудовуваних територій.

Ключові слова: висотна будівля, міська забудова, вітрові навантаження, підвітряні хвилі, інтерференційний ефект, коефіцієнт інтерференції.

ИЗМЕНЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА ЗДАНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

С. Г. Кузнецов, Г. А. Назаров, Э. А. Лозинский

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,

ул. Державина 2, Макеевка, Украина, 86123.

e-mail: gregory_nazarov@mail.ru

Получена 10 марта 2010; принята 26 марта 2010.

Аннотация. Статья посвящена изучению подветренных волн в застройке с высотными зданиями, обладающими свойствами интерференционного эффекта волнообразования, который может привести к многократному увеличению ветровой нагрузки, что не учитывается строительными нормами. В работе рассмотрены характеристики подветренных волн в зависимости от состояния атмосферы и размеров источника волнообразования, геометрических размеров области, где существенны волновые нагрузки и возможны усиления колебаний, оценен перенос энергии подветренными волнами с учетом эффектов диссипации и затухания. Получены результаты расчетов полей возникающих подветренных волн на примере ситуации двух высотных зданий, где определены характер распределения волн и возникающие при этом ветровые давления. Величина дополнительного давления зависит от геометрических размеров зданий и их взаимного расположения. Взаимодействие подветренных волн приводит к возникновению интерференционной картины и, как следствие, к локальному увеличению волнового давления. Введено новое понятие – коэффициент интерференции, позволяющий оценивать силу ветра, действующую на здания в условиях застраиваемых территорий.

Ключевые слова: высотное здание, городская застройка, ветровые нагрузки, подветренные волны, интерференционный эффект, коэффициент интерференции.

CHANGES OF STATIC WIND LOADINGS ON BUILDINGS UNDER THE INFLUENCE OF WIND WAVES

S. G. Kuznetsov, G. A. Nazarov, E. A. Lozinskiy

The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

Derzhavin Street 2, Makeyevka, Ukraine, 86123.

e-mail: gregory_nazarov@mail.ru

Received 10 March 2010; accepted 26 March 2010.

Abstract. The article is devoted to studying leeward waves in urban area with the altitudinal buildings possessing properties of interference effect of wave formation which can lead to multiple increasing of wind loading that is not considered by building standards. The characteristics of the leeward waves depending on the atmosphere state and the sizes of wave formation source, the geometrical sizes of area where wave loadings are essential and vibration strengthening are possible, energy transferring is estimated by leeward waves taking into account dissipation and attenuations effects. There have been received results of fields calculations of arising leeward waves on the example of a situation of two altitudinal buildings where the character of waves distribution of and wind pressure arising with this are defined. The additional pressure value depends on the geometrical building sizes and to their mutual location. Interaction of leeward waves leads to interference picture and, as the consequence, to the local wave pressure enhancing. The new concept the interference factor is entered, allowing to estimate of wind, strengthening influencing on buildings in the conditions of territories building.

Key words: altitudinal building, urban area, wind loads, leeward waves, interference effect, interference factor.

Введение

Высотные здания и сооружения очень чувствительны к ветру, и при их проектировании должен учитываться целый набор уникальных параметров, соответствующих повышенной гибкости конструкции и виду влияния ветра. Особенности геометрической формы зданий и сооружений, а также окружающие их рельеф и строения, влияют на аэродинамическую нагрузку. В области аэродинамики точная оценка ветровых давлений на поверхности зданий и сооружений считается важной с точки зрения анализа реакций конструкций, а также проектирования фасадных частей и покрытий зданий и сооружений.

Ветровые воздействия на высотные здания, располагаемые в низкой застройке или в их комплексе, в строительных нормах не представлены и до настоящего времени достаточно не изучены, а также нормами не регламен-

тируются правила испытания таких застроек на ветровое воздействие. Из опыта аэродинамики известно, что подобного рода объекты являются генераторами подветренных волн. Подветренные волны обладают свойствами интерференционного эффекта волнообразования, который может привести к многократному увеличению ветровой нагрузки.

В случаях необходимости оперативного выполнения расчетов для зданий в условиях окружающей застройки целесообразно использовать сравнительно простые приближенные методы и программы расчета, обеспечивающие достаточную для инженерной практики точность при минимальных затратах времени. Разработка физико-математической модели интерференционного эффекта волнообразования при обтекании высотной застройки и её инженерная реализация решает проблему создания эффективного инструментария проектирования.

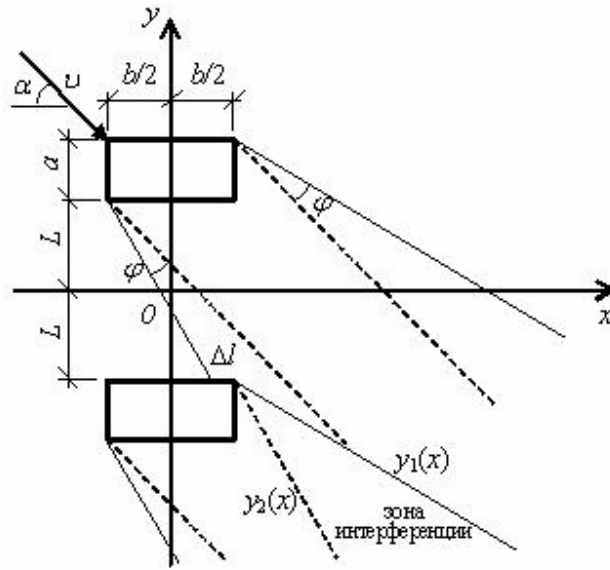


Рис. 1. Расчетная схема определения зоны интерференции подветренных волн.

Цель данной статьи заключается в определении характеристик и геометрии областей взаимодействия подветренных волн в зависимости от состояния атмосферы и размеров источника волнообразования, а также получение коэффициента интерференции, позволяющего оценивать силы ветра, действующие на здания в условиях застраиваемых территорий.

Характеристики и геометрии областей взаимодействия подветренных волн в зависимости от состояния атмосферы и размеров источника волнообразования

Изучение подветренных волн показывает, что их характеристики обусловлены двумя основными факторами: скоростью набегающего потока и характеристиками приземного пограничного слоя. Подветренные волны образуются в тыловой части зданий и сооружений. Скорость набегающего потока должна составлять 5-15 м/с на уровне препятствия в зависимости от его высоты; оптимальные высоты препятствий – от 30 до 300 м. По данным наблюдений значение амплитуд волн пропорционально размерам здания. С амплитудой подветренных волн связаны вертикальные скорости, которые обычно составляют 2-6 м/с, но отмечались значения более 10 м/с.

Если препятствие имеет приблизительно одинаковые размеры как в направлении воздушного потока, так и по нормали к нему, то

под действием прямого переваливания сверху и бокового обтекания с обеих сторон волны приобретают в плане форму подков или клина. Соответствующее расположение облачных полос на космических снимках сходно с расположением волн, возникающих за движущимся судном и именуемых в гидродинамике корабельными волнами. Этот термин нередко применяют и к подветренным волнам. Только в случае строительной практики все происходит наоборот: возмущающий объект неподвижен, а волны генерируются набегающим потоком.

Вполне очевидно, что если совершающие вертикальные колебания частицы воздуха одновременно переносятся крупномасштабным потоком в горизонтальном направлении, то результирующее их движение в вертикальной плоскости приобретает волновой характер. Из этих простых соображений можно получить выражение для длины подветренной волны. Если частица при устойчивой стратификации потока одновременно испытывает колебания с частотой Вейселя-Брента N и перемещается со скоростью U , то длина описываемой ею волны будет примерно равна масштабу L_c :

$$\lambda \approx \frac{2\pi U}{N} = \Lambda_c \quad (1)$$

Этот масштаб определяет длину волны (l), которую образуют частицы воздуха, совершающие

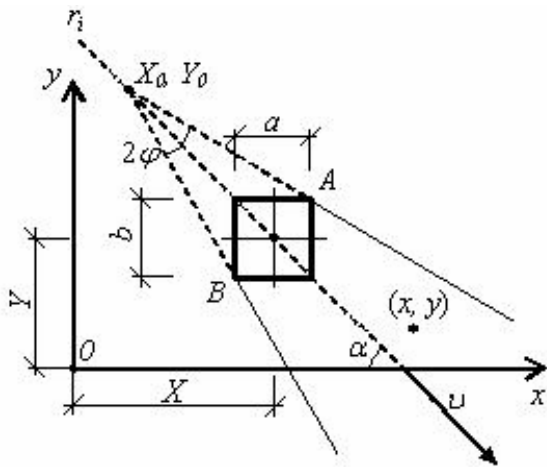


Рис. 2. Расчетная схема определения границ области распространения подветренных волн.

вертикальные колебания с частотой N и перемещающиеся со скоростью U в горизонтальном направлении. Формы зданий (сооружений) в подветренных волнах играют роль возбудителя, а ответная реакция приземного пограничного слоя на это возбуждение полностью определяется ее собственным состоянием.

Установлено, что для образования волновых полос (интерференции воздушных волн) наиболее важными являются следующие факторы:

- геометрические параметры высотных зданий (сооружений), а также соотношение расстояния между объектами и их высотой;
- ориентация высотной застройки относительно набегающего воздушного потока;
- характеристики приземного пограничного слоя атмосферы;
- характеристики (геометрические параметры) низкой застройки, окружающей высотную застройку.

Так, при одних и тех же параметрах набегающего потока за зданиями могут образоваться как подветренные волны, так и вихревые дорожки Кармана. Главным параметром здесь выступает соотношение высота здания – высота инверсии; у небольшого по высоте здания, вершина которого ниже слоя инверсии (реализуется полное обтекание), образуются подветренные волны; если же вершина строения выше слоя инверсии (реализуется только боковое обтекание) – вихревые цепочки.

Кроме определения параметров, характеризующих непосредственно образовавшиеся подветренные волны (такие как амплитуда,

частота и волновой вектор), необходимо также определить размеры области, в которых волнообразование будет вносить дополнительные нагрузки на строения как непосредственно являющиеся волновыми источниками, так и подверженные влиянию уже образовавшихся волновых структур.

Для этого рассмотрим несколько вариантов расположения сооружений и определим размеры областей (см. рис. 1), в которых наблюдаются как непосредственно волнообразование, так и взаимодействие подветренных волн, в частном случае приводящее к их интерференции.

Так как образующиеся подветренные волны находятся внутри клина Кельвина, геометрические размеры которого хорошо известны, то эти результаты можно применить для описания геометрических размеров областей влияния волнообразования на добавочные ветровые нагрузки. Угловые размеры клина Кельвина меняются в зависимости от направления ветрового потока α .

В области, лежащей между прямыми $y_1(x)$ и $y_2(x)$, будет наблюдаться взаимодействие подветренных волн и интерференция, в частности (см. рис. 2).

Расчет дополнительных волновых нагрузок должен производиться по следующей методике:

1. Определение геометрических параметров области и в соответствии с ними зоны интерференции ($x \geq x_0, y_2 \leq y \leq y_1$).
2. Расчет радиуса вектора в точке внутри зоны интерференции на расстояние между данной точкой и центром здания, породившего воздушную волну.
3. Расчет кинетической энергии волн и дополнительных ветровых нагрузок по следующим формулам:

$$\Delta P = \frac{E_k}{v} \quad (2)$$

$$E_k = \frac{\rho g}{32T} (z_1^2(t, r_1) + z_2^2(t, r_2)) \quad (3)$$

где T – период колебаний;

z_1 и z_2 – точка волнового фронта (превышение над нулевым уровнем);

r_1 – расстояние от точки волнообразования до расчетной точки пространства окружающей застройки.

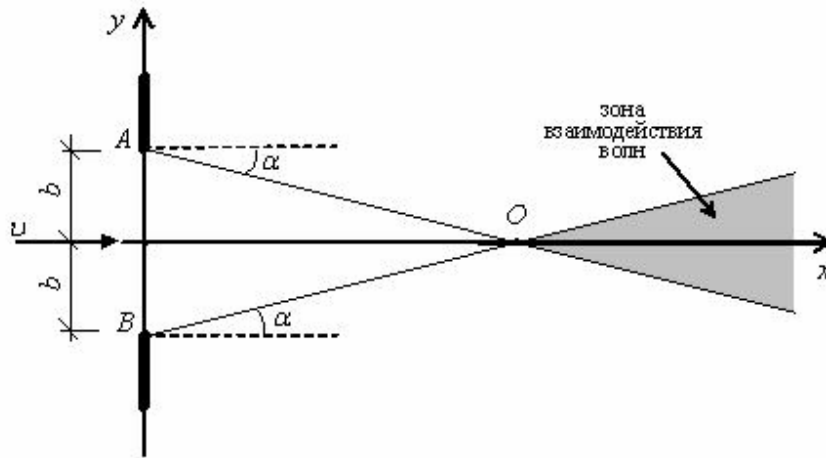


Рис. 3. Частный случай зоны интерференции для зданий, расположенных на одной прямой.

$$z = A(r) \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - kr\right) \quad (4)$$

$$k = \frac{g}{(v \sin \varphi)^2} \quad (5)$$

$$A = \frac{1,132}{k} A_i(r) \quad (6)$$

где $A_i(r)$ – функция Эйри (учитывает затухание волн в среде).

Для учета произвольности расположения источников волнообразования необходимо использовать следующий алгоритм:

1. Выбирается исследуемое направление ветра.
2. По направлению ветра для каждого источника от крайних точек проводятся прямые, образующие клин Кельвина, источником волнообразования выбирается точка схождения прямых.
3. В областях, где нет положения волновых областей, расчет волнового давления определяется по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{\rho g}{32vT} z_i^2(t, r_i) \quad (7)$$

4. Определяется область, где происходит наложение двух и более зон интерференции.
5. Формула для определения r :

$$r_i = \sqrt{(x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2} \quad (8)$$

$$X_0 = \frac{b_2 - b_1}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) - \operatorname{tg}(\alpha - \varphi)} \quad (9)$$

$$b_1 = Y + \frac{b}{2} + \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) \cdot \left(X + \frac{a}{2}\right) \quad (10)$$

$$b_2 = Y - \frac{b}{2} + \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \cdot \left(X - \frac{a}{2}\right) \quad (11)$$

Определим теперь зону интерференции для симметрично расположенных зданий, направление ветра в данном случае будет совпадать с горизонтальной осью координат (см. рис. 3).

Начало координат расположим на прямой, соединяющей максимальные сечения зданий в направлении волны, ось X направлена вдоль направления ветра, ось Y – перпендикулярно ей.

Область, в которой возникает интерференция подветренных волн:

$$\begin{cases} x \geq \frac{b}{\operatorname{tg} \alpha} \\ y \geq -\operatorname{tg} \alpha x + b \\ y \leq \operatorname{tg} \alpha x - b \end{cases} \quad (12)$$

$$x_0 = \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot a}{2 \operatorname{tg} \alpha} + \frac{2b}{2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{a}{2} + \frac{b}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (13)$$

$$y_0 = \operatorname{tg} \alpha \cdot \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{\operatorname{tg} \alpha}\right) - b = \frac{a \operatorname{tg} \alpha}{2} \quad (14)$$

В данной области происходит взаимодействие волн.

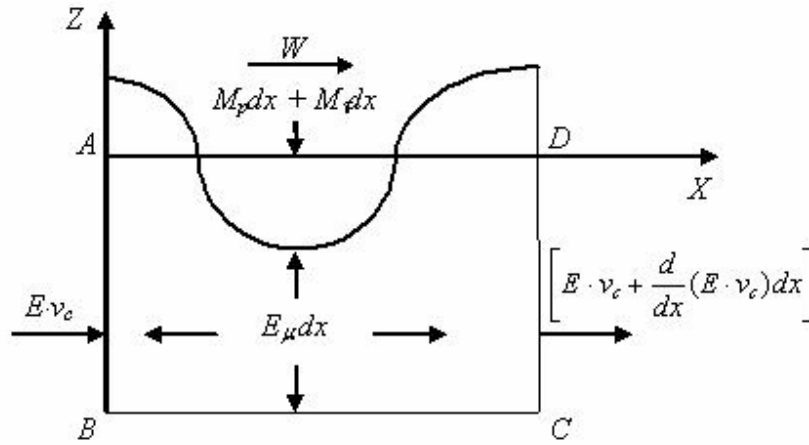


Рис. 4. К выводу уравнения баланса энергии волн.

Волны от здания:

$$\begin{cases} z_1 = A_1 \cos(w_1 t - k_1 x) \\ z_2 = A_2 \cos(w_2 t + k_2 x) \end{cases} \quad (15)$$

Если геометрические параметры здания или сооружения одинаковы, то результирующие колебания имеют следующий вид:

$$z = 2A \cos\left(wt - \frac{kd}{2}\right) \cos\left(kx - \frac{kd}{2}\right) \quad (16)$$

где d – расстояние между зданиями (сооружениями);

w – частота колебаний;

k – волновой вектор.

Энергия, приходящаяся на единицу поверхности волны, принимая, что высота волны равна h_0 ,

$$E = \frac{1}{8} \rho g h_0^2 \quad (17)$$

Из формулы следует, что энергия, заключенная под единичной площадью, зависит только от высоты волны. Квадратичная зависимость указывает на быстрое возрастание энергии при возрастании высоты волны. Поскольку радиусы орбит с глубиной быстро уменьшаются, основная энергия волны сосредоточена в верхней ее части.

Выражение справедливо для двумерной волны, у которой высота волны не меняется вдоль гребня. Для трехмерной волны энергия E_z будет вдвое меньше.

Профиль волн, возникающих за высотными зданиями или сооружениями, описывает-

ся трохойдой, а частицы движутся по замкнутым круговым орбитам.

Для количественной оценки развития ветровых волн необходимо рассмотреть уравнение баланса энергии волн, которое определит физическую сущность развития и затухания волн. Для вывода уравнения баланса энергии ветровых волн примем, что волна является двумерной, и выделим объем с сечением ABCD, расположенным перпендикулярно направлению распространения волн. Ось X направим в сторону распространения волны (по ветру – w), а ось Z – вертикально вверх. Ось Y перпендикулярно к плоскости чертежа (см. рис. 4), а расстояние по оси равным единице. Тогда выделенный объем численно будет равен площади сечения ABCD, что позволяет перейти от трехмерной задачи к двумерной.

Через грань AB слева в единицу времени поступает энергия в количестве $E \cdot v_c$, где v_c – скорость переноса энергии, равная групповой скорости волн.

Через грань DC энергия уходит в количестве

$$E \cdot v_c + \frac{d}{dx}(E \cdot v_c) dx \quad (18)$$

Через грань AD в единицу времени поступает энергия от ветра в количестве $M_p dx + M_t dx$, где M_p – количество энергии, передаваемое ветром за счет нормального давления ветра, отнесенное к единице площади; M_t – то же за счет касательного напряжения.

Наконец, часть энергии в количестве E_m^* dx рассеивается турбулентной вязкостью и

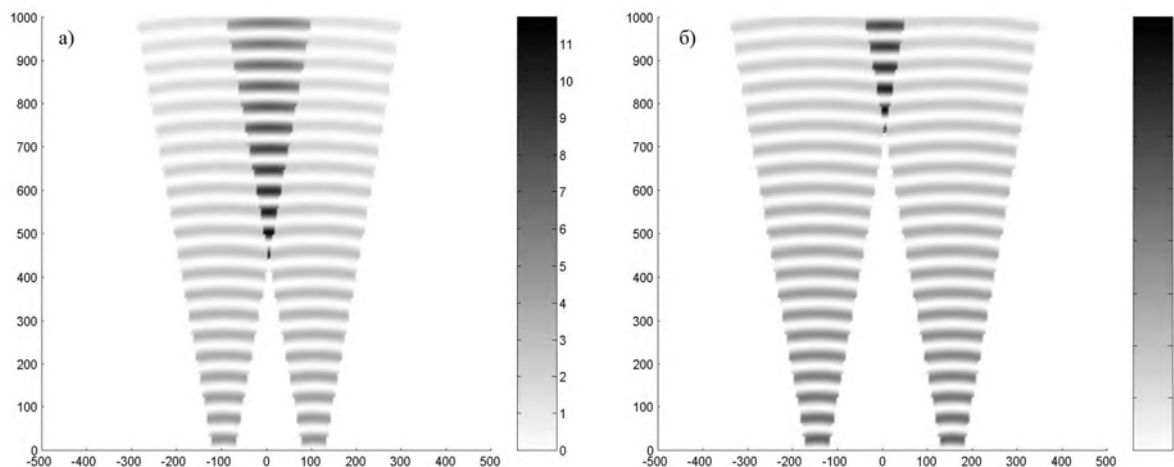


Рис. 5. Результаты расчета поля подветренных волн созданного двумя высотными зданиями при направлении потока $\alpha = 0^\circ$ и скорости потока $v = 5$ м/с (значения даны в Па): а) расстояние между зданиями $L = 3b$; б) $L = 5b$.

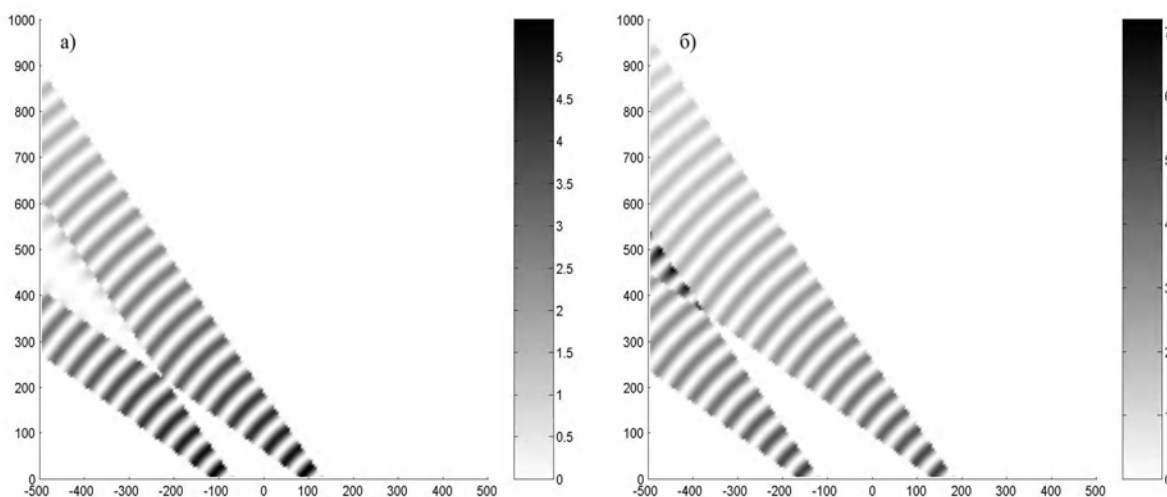


Рис. 6. Результаты расчета поля подветренных волн созданного двумя высотными зданиями при направлении потока $\alpha = 45^\circ$ и скорости потока $v = 5$ м/с (значения даны в Па): а) расстояние между зданиями $L = 3b$; б) $L = 5b$.

переходит в тепло, E_m – количество рассеиваемой энергии, отнесенное к единице площади.

Уравнение баланса энергии ветровых волн:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{d}{dx}(E \cdot v_c) + M_p + M_\tau - E_\mu \quad (19)$$

Рассмотрим несколько вариантов расчетов дополнительных волновых нагрузок в зависимости от скорости ветра и расстояниями между волнообразующими сооружениями (см. рис. 5, 6).

Расстояния между зданиями будем варьировать от 3 до 7 калибров, скорость ветра от 5 м/с до 20 м/с.

Расчет дополнительных волновых нагрузок в зависимости от скорости ветра и расстояниями между волнообразующими сооружениями выполнялся при расстояниях между зданиями от 3 до 7 калибров и скорости ветра от 5 м/с до 20 м/с. В результате выявили, что с увеличением расстояния между зданиями максимум нагрузки уменьшается, это связано с увеличением расстояния на котором возможна

интерференция подветренных волн и, как следствие, затухание амплитуды колебаний. Так как волны для данного случая направления ветра приходят в точку в одной фазе, то наблюдается монотонная зависимость волновой нагрузки от скорости ветрового потока.

Эффект интерференции может быть вычислен двумя способами: первый – берутся величины давлений в определенных точках на опытных моделях и преобразовываются в коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы (боковой силы); второй – принимает моменты или ускорения наверху модели высотного здания. Эффект интерференции определяется как коэффициент интерференции и вычисляется по формуле:

$$IF = \frac{K1}{K2} \quad (20)$$

где $K1$ – соответствующее значение параметра с присутствием здания, $K2$ – соответствующее значение параметра без здания.

Заключение

1. Определены характеристики и геометрия областей взаимодействия подветренных волн в зависимости от состояния атмосферы и размеров источника волнообразования. Введено новое понятие коэффициент интерференции, позволяющий оценивать силы ветра, действующие на здания в условиях застраиваемых территорий.
2. Получены результаты расчетов полей возникающих подветренных волн на примере ситуации двух высотных зданий, где определены характер распределения волн и возникающие с этим ветровые давления, оценен перенос энергии подветренными волнами с учетом эффектов диссипации и за-

тухания. Величина дополнительного давления зависит от геометрических размеров здания и взаимного расположения. Взаимодействие подветренных волн приводит к возникновению интерференционной картины и, как следствие, к локальному увеличению волнового давления. В частности при неблагоприятных условиях, например, при угле направления ветра 60° , расстоянии между зданиями 5 калибров и скорости ветра 15 м/с волновое давление в зоне интерференции составляет 6 Па при исходных значениях для каждой из интерферирующих волн 1,5 Па.

Литература

1. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения.- Донецк: Норд-Пресс, 2009.- 168 с.
2. Кузнецов С.Г. Эффекты волнообразования при обтекании ветровым потоком высотных зданий и сооружений.- Донецк: Норд-Пресс, 2009.- 200 с.
3. Реттер Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1984.- 415 с., ил.
4. Методы расчета турбулентных течений: Пер. с англ. / Под ред. В. Кольмана. - М.: Мир, 1984.- 464 с., ил.
5. Cook N.J. The designer's guide to wind loading of building structures. Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification.- Garston, Building research establishment, London. 1985.-372 p.
6. Dyrbye C., Hansen S.O. Wind loads on structures. New York: John Wiley & Sons. 1999.- 229 p.
7. Holmes J.D. Wind loading of structures. Great Britain: Eastbourne. 2005. –356 p.
8. Irwin H.P.A.H. The design of spires for wind simulation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 7 (1981), pp. 361-366.
9. Lawson T. Building aerodynamics. London: Imperial College Press. 2001. 286 p.

Кузнецов Сергій Георгійович – д.т.н., доцент, завідувач кафедри містобудування й інженерної графіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розвиток методики оцінки вітрового впливу на будівлі, споруди та їх комплекси, удосконалення методик моделювання приземного пограничного шару атмосфери, натурних і модельних випробувань будівель та споруд на вітрове навантаження.

Назаров Григорій Олександрович – асистент кафедри міського будівництва і господарства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: вивчення розсіювання забруднюючих речовин від автономних джерел тепlopостачання в існуючій або проєктованій забудові за допомогою натурних спостережень, випробувань в аеродинамічній трубі і математичного моделювання.

Лозінський Едуард Олександрович – асистент кафедри архітектури промислових і цивільних будівель Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розвиток методики оцінки вітрових дій на будівлі, споруди і їх комплекси, вдосконалення методик моделювання натурних і модельних випробувань будівель і споруд на вітровий тиск.

Кузнецов Сергей Георгиевич – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой градостроительства и инженерной графики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: развитие методики оценки ветровых воздействий на здания, сооружения и их комплексы, совершенствование методик моделирования приземного пограничного слоя атмосферы, натурных и модельных испытаний зданий и сооружений на ветровое давление.

Назаров Григорий Александрович – ассистент кафедры городского строительства и хозяйства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: изучение рассеивания загрязняющих веществ от автономных источников теплоснабжения в существующей или проектируемой застройке с помощью натурных наблюдений, испытаний в аэродинамической трубе и математического моделирования.

Лозинский Эдуард Александрович – ассистент кафедры архитектуры промышленных и гражданских зданий Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: развитие методики оценки ветровых воздействий на здания, сооружения и их комплексы, совершенствование методик моделирования натурных и модельных испытаний зданий и сооружений на ветровое давление.

Kuznetsov Sergey Georgievich – doctor of engineering sciences, assistant professor, the Head of the “Town-planning and the Engineering Graphics” Chair of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of method of wind effects estimation on buildings, structures and their complexes; perfection of modeling methods of the ground atmospheric boundary layer; natural and modeling building and structures tests on the wind pressure.

Nazarov Gregoriy Alexandrovich an assistant of “the Municipal Building and Economy” chair of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: study of containments dispersion from the autonomous sources of heat supply in the existenting or designing building by means of model supervisions, tests in a the aerodynamics tube and mathematical modeling.

Lozinskiy Edward Aleksandrovich is an assistant of the “Architecture of Industrial and Civil buildings” Chair of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of estimation method of wind effects on buildings, structures and their complexes, perfection of modeling methods of design natural and model tests of buildings and structures on the wind pressure.