

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

В. В. Леденев, А. Чхум

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. П. Ярцев

Ключевые слова и фразы: аэродинамические характеристики; высотное здание; компьютерное моделирование; конструктивная схема рамно-связевого каркаса; несущий элемент; экспериментальные исследования.

Аннотация: Дан анализ конструктивных решений уникальных зданий и сооружений, применяемых в мировой практике. Рассмотрены нагрузки и воздействия на конструкции и связи. Приведены современные методы расчета на прочность, устойчивость и жесткость. Дано описание роли и конструкции диафрагм. Изложены способы и результаты экспериментальных исследований, в том числе в аэродинамической трубе. Показаны данные численного компьютерного моделирования, способствующего предотвращению прогрессирующего разрушения.

Введение

Высотные здания имеют свою специфику, существенно отличающую их от обычных [1]. Для проектирования вертикальной несущей системы решающими нагрузками являются: собственный вес, динамическая нагрузка и ветер [2], которые совместно образуют силу, передающуюся на фундамент. Чем ближе направление силы к горизонтальной плоскости, тем труднее ее отводить (рис. 1).

Предлагаются варианты компоновки связи с использованием: 1) гибких элементов (канаты, тросы); 2) механизмов, благодаря которым исключается возможность появления сжимающих усилий в раскосах диафрагмы [3, 4].

По *первому* варианту элементы связи изготавливаются из гибких материалов – тросов или канатов, имеющих малую изгибную жесткость и, следовательно, незначительную устойчивость к сжимающим нагрузкам. В результате элементы данной связи не будут работать на сжатие, так как не имеют достаточной жесткости и устойчивости к обеспечению своего положения в равновесии. При возникновении растягивающих усилий

Леденев Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений», e-mail: kzis@nnn.tstu.ru; Чхум Амнот – магистрант кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ТамбГТУ, г. Тамбов.

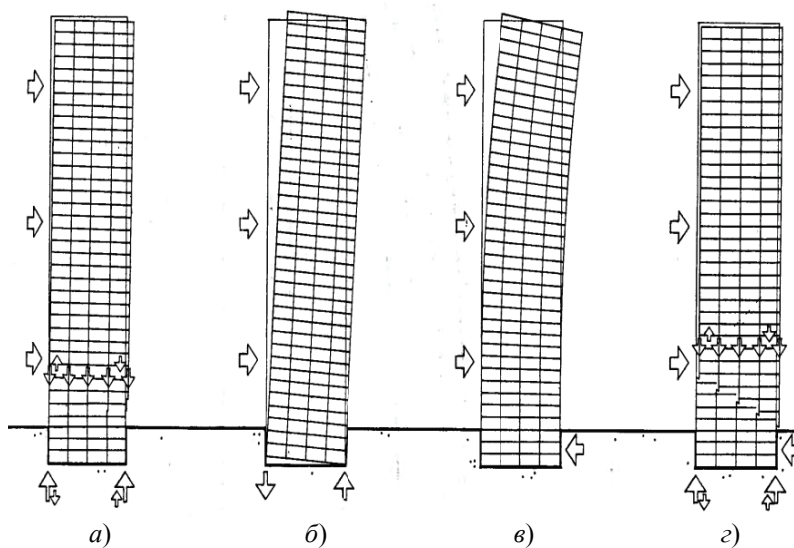


Рис. 1. Критические нагрузки и деформации:
a – силы сжатия; *б* – опрокидывающие моменты;
в – изгибающие моменты; *г* – поперечные силы

и действию горизонтальных нагрузок диагональные элементы связи (канаты) будут включаться в работу, увеличивая тем самым изгибную жесткость рамы в целом (рис. 2).

Рамно-связевая система – система, состоящая из рам (каркаса) и вертикальных диафрагм, стен или ядер жесткости и воспринимающая горизонтальные и вертикальные нагрузки. При этом данные нагрузки распределяются между рамами (каркасами) и вертикальными диафрагмами (или другими элементами) в зависимости от соотношения жесткостей этих элементов. Диафрагма – сплошной или решетчатый элемент пространственной конструкции, способствующий увеличению ее жесткости.

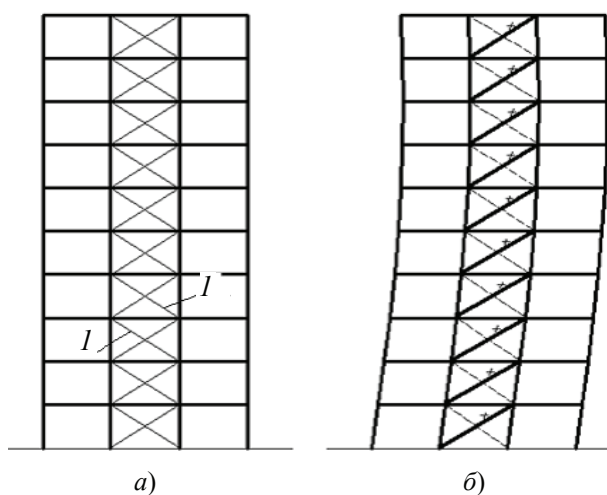


Рис. 2. Компоновочная (а) и деформированная (б) схемы:
I – канаты (тросы)

Следует отметить, что применение *второго* варианта компоновки связи может быть оправдано только в случае невозможности использования первого варианта или для зданий небольшой этажности (9 – 12 этажей), поскольку способ исключения связи, основанный на применении механизмов, более трудоемок и сложен как при изготовлении, так и в процессе монтажа. Кроме того, он имеет меньшую долговечность ввиду истираемости контактирующих в шарнире стальных элементов. Таким образом, для высотных зданий шарнирный узел второго варианта необходимо проектировать из высокопрочных и износостойких сталей или сплавов, что удорожает общую конструкцию диафрагмы. Единственное достоинство данного решения заключается в применении привычных материалов, однако, учитывая более высокую сложность механизмов шарниров связи, первый вариант для зданий выше 12 этажей представляется наиболее эффективным. На основании вышесказанного можно выделить основные достоинства диафрагмы в канатном исполнении:

- экономичность, достигаемую использованием высокопрочных канатов;

- незначительную трудоемкость и простоту установки;

- возможность оптимального конструирования диафрагмы по высоте, достигаемую уменьшением сечений канатов или изменением их числа в зависимости от нагрузок и высоты здания, так как известно, что оптимальная конфигурация диафрагмы та, которая имеет бóльшую жесткость (более развита) у основания здания;

- из-за исключения возможности восприятия вертикальных сжимающих усилий между элементами связи исчезает негативный эффект «подвижения» смежных с диафрагмой колонн и, как следствие, работа ригелей становится практически независимой от разности осадок колонн и диафрагмы;

- простоту подбора сечений канатов, обеспечиваемую простотой работы связи как обычной раскосной фермы;

- быстроту устройства связи и ее ремонтпригодность;

- низкие финансовые затраты при эксплуатации здания.

Следует отметить, что предложенное конструктивное решение диафрагмы жесткости основано на комплексных научных исследованиях влияния диафрагм жесткости на напряженно-деформируемое состояние (НДС) каркаса здания и является их прикладной реализацией.

Аэродинамические характеристики здания

С точки зрения аэродинамики высотные здания представляют собой типичные плохо обтекаемые объекты среднего относительного удлинения $H/D = 3 \dots 6$, где H , D – высота и длина здания соответственно. На рисунке 3 схематично представлена картина ветрового потока около одного из таких сооружений, его средняя скорость $v(z)$ в приземном слое, толщина которого более 300 м, возрастает с высотой z над уровнем подстилающей поверхности [5, 6]. Течение с наветренной стороны здания характеризуется наличием нисходящих потоков в нижней части фасада, у подветренной стороны происходит сильное понижение давления. Возникающие возвратно-циркуляционные зоны у подветренной и боковых сторон здания являются переменными во времени, что приводит к дополнительным динамическим нагрузкам на ограждающие конструкции здания [5, 7].

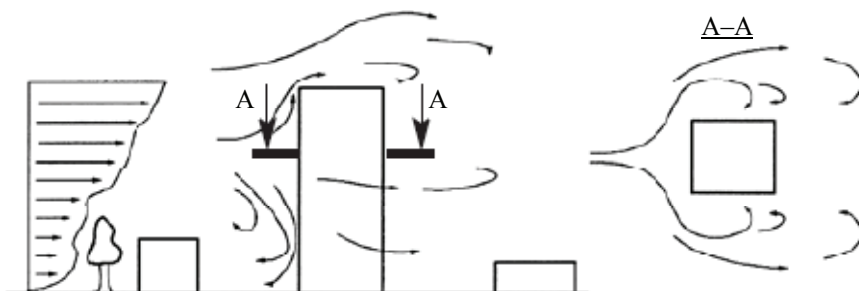


Рис. 3. Схема обтекания ветровым потоком высотного здания

Давление на поверхности здания выражается в безразмерном виде через аэродинамический коэффициент давления C_p

$$C_p = \frac{p - p_0}{0,5\rho v_0^2}, \quad (1)$$

где p – давление в точке на поверхности здания, Па; p_0 – атмосферное давление, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³; v_0 – характерная скорость потока «на бесконечности» вне области распространения возмущений, связанных с обтеканием здания, м/с. В ряде случаев в качестве характерной для всего здания берется скорость невозмущенного ветрового потока на максимальной высоте здания.

В других случаях, например в [8, 9], подразумевается, что $v_0 = v(H)$, то есть берется скорость настилающего ветрового потока на уровне $z = H$, где z – расстояние от поверхности земли для точки фасада, в которой определяется давление p (1). Следует подчеркнуть, что само по себе числовое значение аэродинамического коэффициента давления C_p без указания способа определения v_0 не позволяет судить о действительном ветровом воздействии. При определении v_0 всегда указываются дополнительные условия. Изменение скорости ветра по высоте в приземном пограничном слое означает, что набегающий ветровой поток изначально является завихренным, поэтому даже в простейшем приближении, применяя уравнение Бернулли

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{const}, \quad (2)$$

необходимо учитывать, что правая часть является константой только вдоль линий потока, а не во всем пространстве. Представим константу [7] в виде

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = p_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2, \quad (3)$$

тогда преобразование выражения (1) с использованием (3) запишем

$$C_p = \frac{0,5\rho(v_0^2 - v^2)}{0,5\rho v_0^2} = 1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2. \quad (4)$$

Методы, используемые для расчетов нагрузок при проектировании зданий, можно разбить на три основных класса:

- приближенные инженерные расчеты;
- экспериментальное моделирование;
- численное моделирование.

Каждый из методов обладает как преимуществами, так и недостатками, поэтому целесообразно использовать их сочетание.

Теоретическое обоснование инженерных методик

Приближенные инженерные методики базируются на известных данных о характеристиках приземного пограничного слоя, а также на различных экспериментальных и теоретических сведениях о свойствах обтекания тел воздушным потоком, выраженных в виде таблиц коэффициентов. Для практического применения таких методик к высотным зданиям требуются дополнительные исследования по определению параметров, учитывающих специфику конкретного объекта.

Турбулентная нестационарная природа ветрового потока, а также возникающие в процессе обтекания сооружения периодические вихревые структуры приводят к тому, что значения аэродинамического коэффициента давления также меняются во времени. Поэтому внешнее давление на поверхности фасадов и покрытий характеризуется средним значением и пульсационной составляющей. Физическая природа пульсаций давления определяется двумя основными факторами. *Во-первых*, наличием в настиляющем ветровом потоке естественных турбулентных колебаний скоростного напора (пульсации первого рода); *во-вторых*, образованием и нестационарным срывом вихрей при обтекании фасадов здания (пульсации второго рода).

В существующих строительных нормах при определении аэродинамических характеристик применяется так называемый квазистационарный подход. Изменение давления (по отношению к атмосферному) в точке поверхности фасада здания записывается как

$$p(t) = 0,5C_{p0}\rho\bar{v}(t)^2, \quad (5)$$

где C_{p0} – некоторый квазистационарный коэффициент давления при постоянной скорости, соответствующей среднему значению $\bar{v}(t)$; t – температура поверхности воздуха, °С.

Раскладывая $v(t)$ на среднюю и пульсационную составляющие, получаем

$$p(t) = 0,5C_{p0}\rho[\bar{v} + v'(t)]^2 = 0,5C_{p0}\rho[\bar{v}^2 + 2\bar{v}v'(t) + v'(t)^2], \quad (6)$$
$$v'(t) = v'_1(t) + v'_2(t),$$

где $v'_1(t)$ и $v'_2(t)$ – первичные и вторичные пульсационные составляющие соответственно.

По своей природе первичные пульсации, присущие набегающему ветровому потоку, являются одной из его характеристик. Возникновение вторичных пульсаций связано с нестационарным обтеканием строительного сооружения и теми возмущениями, которые вносят в поток выступающие

остроугольные грани строительного объекта. Отсюда среднее по времени значение давления

$$\bar{p} = 0,5C_{p0}\rho[\bar{v}^2 + \sigma_u^2], \quad \sigma_u^2 = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T v[v(t) - \bar{v}] dt \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где σ_u – среднее квадратическое отклонение; T – продолжительность появления скоростей ветра v .

Для малой турбулентной интенсивности значение дисперсии мало по сравнению с квадратом среднего.

Тогда значение квазистационарного коэффициента давления C_{p0} приблизительно равно среднему значению коэффициента давления:

$$\bar{p} \cong 0,5C_{p0}\rho\bar{v}^2. \quad (8)$$

Путем вычитания из обеих частей выражения (6) соотношения для средней составляющей ветрового давления (8) приходим к выражению для пульсации давления

$$p'(t) = 0,5C_{p0}\rho[2\bar{v}v'(t) + v'(t)^2]. \quad (9)$$

Пренебрегая дисперсией $v'(t)^2$ и взяв среднее, получаем выражение, связывающее среднее квадратическое отклонение давления со средним квадратическим отклонением скорости

$$\bar{p}' \cong \bar{C}_p\rho\bar{v}\bar{v}'. \quad (10)$$

Если использовать обозначения СНиП [8], то с учетом того, что

$$w_0 = 0,61v_{10}^2 = 0,5\rho v_{10}^2; \quad w_m = w_0k(z)\bar{C}_p = 0,5\rho\bar{v}^2\bar{C}_p,$$

где w_0 – расчетное значение ветрового давления; w_m – расчетное значение средней составляющей ветровой нагрузки; v_{10} численно равно скорости ветра, м/с, на уровне 10 м над поверхностью земли для местности типа А, соответствующей 10-минутному интервалу осреднения и превышаемой в среднем раз в 50 лет (если техническими условиями, утвержденными в установленном порядке, не регламентированы другие периоды повторяемости скоростей ветра) [8]; k – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте, выражение (10) можно преобразовать

$$\bar{p}' \cong \bar{C}_p\rho\bar{v}\bar{v}' = \frac{\bar{C}_p\rho\bar{v}^2\bar{v}'}{\bar{v}} = w_m \frac{2\bar{v}'}{\bar{v}}, \quad (11)$$

где $\bar{v}'/\bar{v} = 1$ есть не что иное, как определение интенсивности турбулентных пульсаций ветрового потока. Соотношение (11) аналогично выражению для пульсационной составляющей ветровой нагрузки по [8]:

$$w_p = w_m\zeta(z), \quad (12)$$

где w_p – расчетное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки; $\zeta(z)$ – коэффициент, учитывающий изменение пульсаций давления ветра относительно высоты z , представленный в [8]: в табличном виде для трех основных типов шероховатости подстилающей поверхности.

Физическое моделирование в аэродинамической трубе

Физическое моделирование означает, что используется аэродинамическая установка, оснащенная средствами формирования задаваемых профилей воздушного потока и параметров его турбулентности, а также средствами измерения средних и пульсационных составляющих давления по всей поверхности исследуемого объекта. При этом сам объект и окружающие его соседние сооружения воспроизводятся на моделях в масштабе, допускающем их размещение в рабочей части аэродинамической трубы, то есть от 1 : 500 до 1 : 100. При моделировании необходимо выполнить ряд условий: геометрическое подобие; подобие структуры потока в аэродинамической трубе заданным ветровым режимам; моделирование ситуационного плана в области радиуса r до $3H$. Однако полное аэродинамическое подобие недостижимо, в частности невозможно обеспечить натурные числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\rho v L}{\mu}, \quad (13)$$

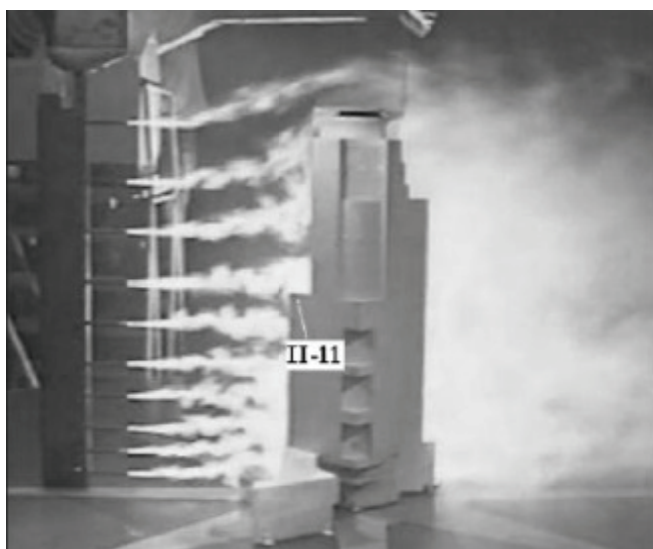
где L – характерный линейный размер сооружения, м; μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с (при температуре 20 °С $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с). Число Рейнольдса является критерием подобия аэродинамических процессов. В любом испытании модели здания в аэродинамической трубе число Re будет на два порядка меньше, чем в натуральных условиях, поскольку линейные размеры модели на два порядка меньше линейных размеров здания. Поэтому принимают различные гипотезы об автомодельности по числу Рейнольдса, по крайней мере, начиная с $\text{Re} = 106$ и выше.

На рисунке 4 показан пример экспериментального определения в аэродинамической трубе НИИ механики МГУ аэродинамических характеристик макета высотного здания ($H = 188$ м). Струйки дыма визуализируют картину обтекания; датчики давления, расположенные в 120 дренажных точках на фасадах, позволяют определять распределение аэродинамического коэффициента C_p ; шестикомпонентные электромеханические весы измеряют результирующие силы и моменты суммарного ветрового воздействия на сооружение при различных азимутах ветра. В данном случае полученные значения коэффициента давления C_p в зависимости от направления ветра изменяются в основном от +1 до -1,5. При этом на фасадах в окрестности острых выступов среднее значение указанного коэффициента может достигать $C_p = -2,5$ и ниже (см. рис. 4, б), а в некоторых точках кровли $C_p = -3,0$.

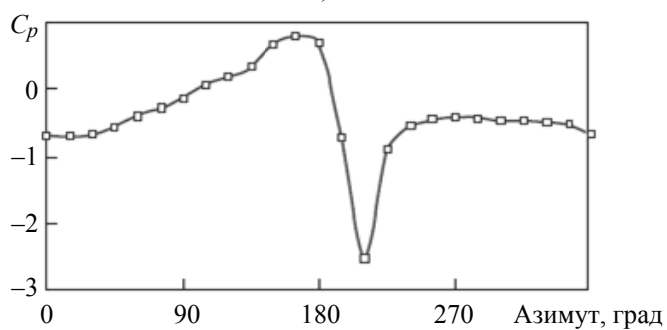
На рисунке 4, в приведены результаты весовых испытаний макета здания по определению лобового сопротивления. Измерена интегральная сила сопротивления C_x в зависимости от угла атаки и интенсивности турбулентности набегающего потока. Установлено, что интенсивность турбулентных пульсаций оказывает слабое влияние на среднее по времени интегральное значение силы лобового сопротивления.

На рисунке 5 проиллюстрирован пример трехмерного расчета мгновенного распределения давления по фасадам здания, представлены результаты компьютерного моделирования ветровых воздействий на высотное здание, которые позволяют выделить на фасаде зоны с наибольшим

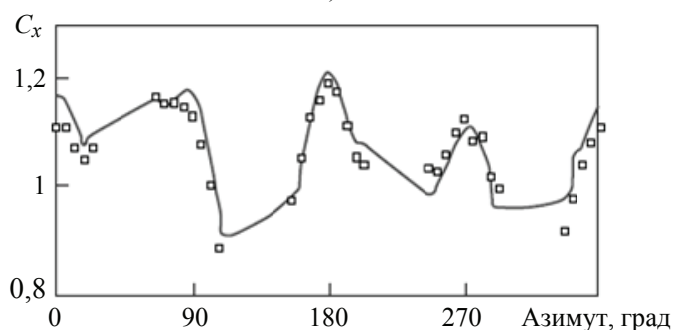
ветровым воздействием на ограждающие конструкции. Мгновенные значения C_p значительно превосходят значения СНиП [8], что указывает на существенность учета вторичных пульсаций.



а)



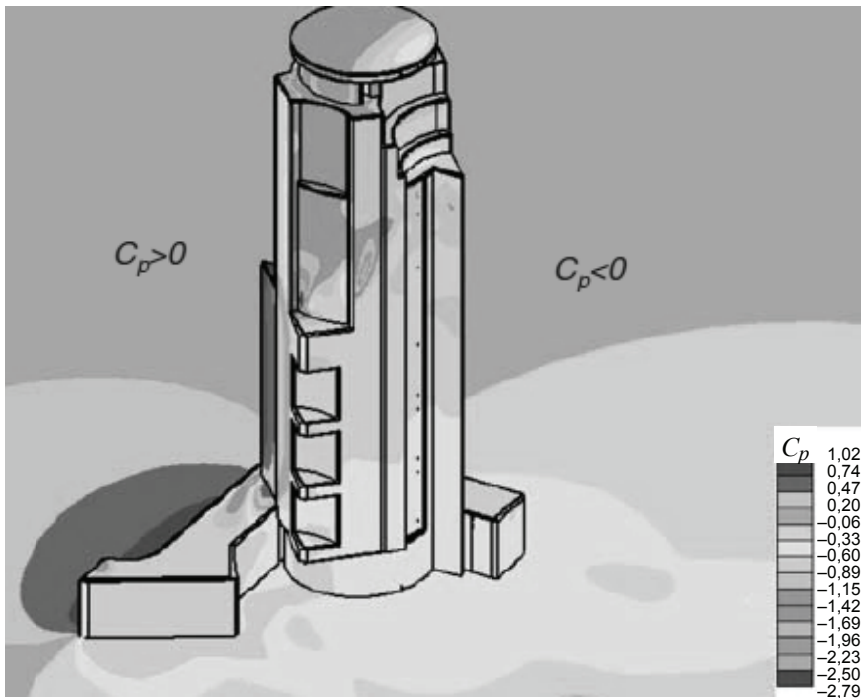
б)



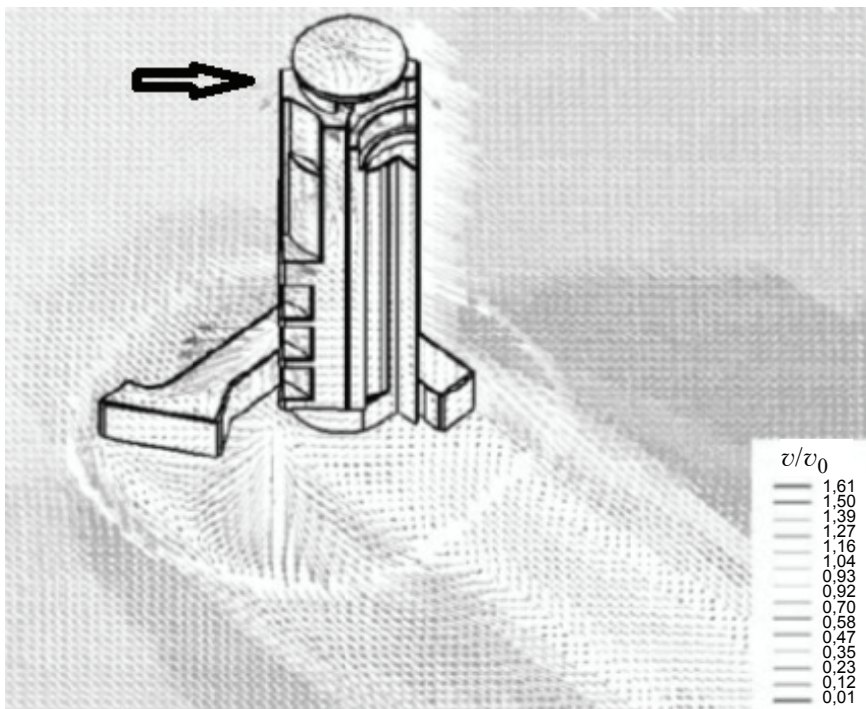
в)

Рис. 4. Экспериментальное определение аэродинамических характеристик макета высотного здания:

а – дымовая визуализация обтекания здания; б – C_p в зависимости от направления ветрового потока, по результатам дренажных измерений в точке П-11 на рис. 4, а; в – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления по результатам весовых испытаний при интенсивности турбулентности 0,2 % (кривая), 2 % (значки)



a)



б)

Рис. 5. Результаты численного моделирования трехмерного обтекания здания (поток ветра слева направо):
a – мгновенное распределение C_p на поверхности фасадов;
б – мгновенные направления потоков вблизи здания

Заключение

Анализ несущих систем высотных зданий, построенных по всему миру, показывает, что их конструктивное и компоновочное решения зависят, главным образом, от высоты объекта. Однако существенное влияние на выбор конструктивной схемы оказывают и такие факторы, как сейсмическая активность района строительства, инженерно-геологические условия, атмосферные и в первую очередь ветровые воздействия, архитектурно-планировочные требования. В каждом конкретном случае инженер принимает техническое решение в соответствии с требованиями, установленными международными или национальными стандартами, нормами проектирования или другими руководящими документами, с учетом собственного опыта и интуиции. Физическое и компьютерное моделирование основаны на ряде предположений общего характера, из нормативных документов требуется лишь информация о задаваемых характеристиках исходного ветрового потока. При определении ветровых нагрузок на высотные здания целесообразно сочетать оба метода, поскольку они дополняют друг друга и позволяют вносить необходимые уточнения при определении нагрузок на фасады зданий.

Список литературы

1. Щукина, М. Н. Современное высотное строительство / М. Н. Щукина, Ю. Г. Граник. – М. : ИТЦ Москомархитектуры, 2007. – 464 с.
2. Энгель, Х. Несущие системы / Хайно Энгель ; предисл. Ральфа Рапсона; пер. с нем. Л. А. Андреевой. – М.: АСТ: Астрель, 2007. – 344 с.
3. Григоршев, С. М. Анализ влияния диафрагм жесткости на формирование напряженно-деформированного состояния многоэтажных рамно-связевых зданий / С. М. Григоршев // Вестн. МГСУ. – 2011. – № 1. – С. 70 – 78.
4. Григоршев, С. М. Особенности взаимодействия диафрагм жесткости с элементами в зданиях с рамно-связевой конструктивной схемой / С. М. Григоршев, А. И. Сапожников // Строит. материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2010. – № 11. – С. 29 – 31.
5. Гувернюк, С. В. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий / С. В. Гувернюк, В. Г. Гагарин // АВОК. – 2006. – № 8. – С. 18 – 24; 2007. – № 1. – С. 16 – 22.
6. Симиу Э. Воздействие ветра на здания и сооружения : пер. с англ. / Э. Симун, Р. М. Сканлан ; под ред. Б. Е. Маслова. – М. : Стройиздат, 1984. – 360 с.
7. Holmes, J. D. Wind Loading of Structures / J. D. Holmes. – London : Spon Press, 2001. – 448 p.
8. Нагрузки и воздействия : СНиП 2.01.07–85 : утв. постановлением Гос. комитета СССР по делам стр-ва от 29 авг. 1985 г. № 135 : введ. 1987–01–01. – М. : ГП ЦПП, 1996. – 44 с.
9. Временные нормы и правила проектирования многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в городе Москва : МГСН 4.19–2005 : утв. постановлением Правительства Москвы от 28 дек. 2005 г. № 1058-ПП : введ. 28.12.2005. – М., 2005. – 126 с.

References

1. Shchukina M.N., Granik Yu.G. *Sovremennoe vysotnoe stroitel'stvo*, Moscow, ITTs Moskomarkhitektury, 2007, 464 p.
2. Engel H. *StructureSystems*, Ostfildern: HatjeCantz, 1998, 280 p.
3. Grigorshev S.M. *Vestnik MGSU*, 2011, no.1, pp.70-78.
4. Grigorshev S.M. *Stroitel'nye materialy oborudovanie i tekhnologii XXI veka*, 2010, no. 11, pp. 29-31.
5. Guvernyuk S.V., Gagarin V.G. *AVOK*, 2006, no. 8, pp. 18-24, 2007, no. 1, pp. 16-22.
6. Simiu E., Scanlan R.H. *Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering*, New York, Wiley-Interscience, 1996.
7. Holmes J.D. *Wind Loading of Structures*, London: Spoon Press, 2001, 448p.
8. Ministry of construction of the Russian Federation, *SNiP 2.01.07-85. Nagruzki i vozdeistviya* (Building regulations. SNiP 2.01.07-85. Load and impact), Moscow, 1996, 44 p.
9. Government of Moscow, *MGSN 4.19-2005. Vremennye normy i pravila proektirovaniya mnogofunktional'nykh vysotnykh zdaniy i zdaniy-kompleksov v gorode Moskve* (Moscow city building code. MGSN 4.19-2005. Temporary regulations multifunctional design of tall buildings and complexes of buildings in Moscow), Moscow, 2005, 126 p.

Design Solutions of Unique Buildings and Structures

V. V. Ledenev, A. Chhom

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: aerodynamic characteristics; computer modeling; constructive scheme braced frame; bearing element; experimental studies; high-rise buildings; high-rise structures; walling.

Abstract: The paper describes a new design solution of diaphragm stiffness for a multistory building, including a high-rise building, which eliminates the possibility of its combined action with the frame of the building on the vertical loads. This is achieved by the design of elements of shear wall coupling and current methods of determining wind effects on building enclosure, which include engineering calculations by reference data, experimental tests in the wind tunnel, numerical computer simulation. The features and examples of each of these methods are discussed.

© В. В. Леденев, А. Чхум, 2014

Статья поступила в редакцию 17.03.2014 г.