

Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на высотное здание

С. В. Гувернюк, канд. физ.-мат. наук, доцент, зам. директора Института механики МГУ;
В. Г. Гагарин, доктор техн. наук, профессор, зав. лабораторией НИИСФ

1. Введение

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 ветра 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 геоме-

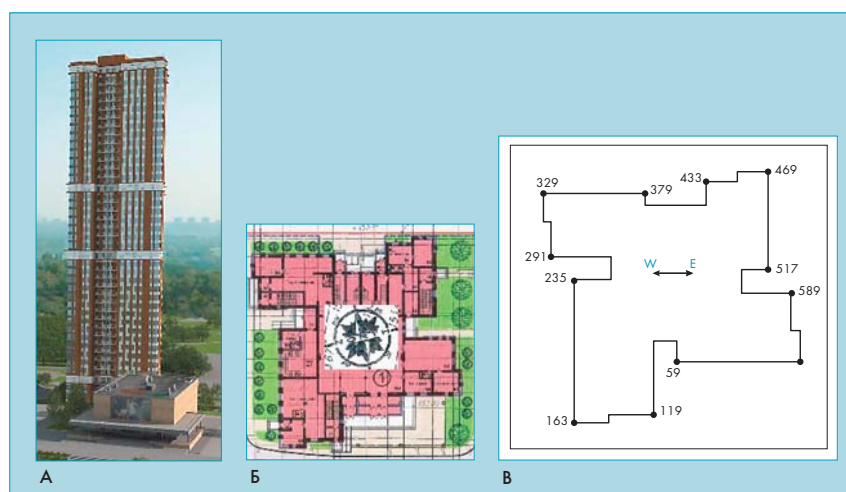
трическую форму, вызывает вопросы, поскольку методики базируются, в основном, на опыте проектирования зданий малой и средней высоты достаточно простой формы [1, 2].

Необходимая информация о распределении ветровых нагрузок на высотные сооружения сложной конфигурации может быть получена с помощью методов физического (в аэродинамических трубах) или математического (компьютерного) моделирования [4–6]. И в том, и в другом методе имеется ряд проблем адекватного моделирования натуральных явлений. Однако стоимость проведения физических исследований в аэродинамических трубах постоянно возрастает, поэтому все более широкое применение

находят так называемые компьютерные CFD-технологии математического моделирования (CFD – Computational Fluid Dynamic).

К настоящему времени разработаны и распространяются разнообразные универсальные компьютерные CFD-пакеты (FLUENT, STAR-CD, VP2/3, FLOW3D, ANSYS-CFX и др.), основанные на численном решении систем уравнений, отражающих общие законы механики сплошной среды и предназначенные для решения широкого круга задач прикладной аэрогидродинамики и теплообмена [7–10]. Применение пакетов такого уровня в практике строительных расчетов еще только начинается, поскольку они очень сложны и для их эффективного использования требуется длительный опыт и высокая квалификация пользователей.

Одна из главных трудностей моделирования ветровых воздействий в рамках полной трехмерной нестационарной постановки задачи вязкого турбулентного обтекания высотного здания связана с повышенными требованиями к мощности вычислительных платформ. Обычные персональные компьютеры обеспечивают адекватные ресурсы лишь при решении двумерных задач. Для проведения массовых нестационарных трехмерных расчетов с помощью перечисленных CFD-пакетов требуются дорогостоящие высокопроизводительные многопроцессорные системы кластерного уровня.



■ Рис. 1. А – Проектируемое здание; Б – план типового этажа;
В – схема двумерного профиля здания, принятая в расчетах

Известны также альтернативные, основанные на технологии дискретных вихревых элементов в идеальной жидкости, методы быстрого трехмерного расчета [6]. Однако неизбежные в этом случае упрощающие предположения о свойствах воздушной среды приводят к тому, что скорость ветрового потока должна быть принципиально постоянной по высоте. Поэтому наличие в реальном настилающем ветре сдвига средней скорости ставит большие трудности на пути корректного применения подобных методов.

Не моделируется изменение средней скорости ветра по высоте и в обычных аэродинамических трубах. Для создания достаточно толстого пограничного слоя необходимы специальные аэродинамические установки с длинной рабочей частью порядка 50–100 м. В мире существует лишь несколько таких установок (метеорологических аэродинамических труб).

При численном моделировании поперечного обтекания центральной части высокого здания с использованием двумерных подходов сдвиг ветра можно учесть лишь косвенно, приравнявая скорость набегающего равномерного потока скорости ветра на заданной высоте над уровнем земли. В рамках трехмерных CFD-технологий учет стационарного сдвигового профиля ветра дополнительных трудностей не представляет. Однако в любом случае остаются проблемы адекватного моделирования влияний атмосферной турбулентности, поскольку реальный приземный пограничный слой содержит вихри, масштаб которых превышает характерный поперечный размер здания. Используемые в упомянутых CFD-пакетах дифференциальные модели изотропной турбулентности позволяют учитывать только мелкомасштабную часть спектра и не могут отличать влияние низкочастотных нестационарных ветровых порывов от крупных вихрей в настилающем ветровом потоке. И численное, и физическое моделирование крупномасштабных пульсаций в приземном пограничном слое связано с необходимостью воспроизведения всего частотно-энергетического спектра пульсаций. В метеорологических аэродинамических трубах для этого специальным образом устанавливаются системы разного рода выступов и шероховатостей. При численном моделировании можно попытаться применять стохастические методы восстановления пульсаций набегающего потока по заданным основным характеристикам частотно-энергетического спектра.

В существующих инженерных методиках [1–3] влияние изменения средней и пиковой пульсационной составляющих скорости ветра с высотой над уровнем земли учитывается путем задания соответствующих коэффициентов ветровых нагрузок. Однако в них никак не учитываются интенсивные вторичные пульсации давления на поверхности тел, неизбежно возникающие из-за образования и срыва крупных вихрей при обтекании «плохообтекаемого» контура здания. С другой стороны, двумерные расчеты обтекания контура горизонтального сечения здания способны вполне адекватно воспроизводить явление образования и срыва вихрей (причем со значительным запасом по интенсивности колебаний нагрузок на обтекаемой поверхности в сравнении с соответствующим трехмерным расчетом). Поэтому вполне разумным путем проведения расчетов ветровых нагрузок является сочетание традиционных



Danfoss

Компания «Элита» — генеральный дистрибьютор тепловой автоматики Danfoss в России

Терморегуляторы

Термостатические элементы.
Присоединительные
и регулирующие клапаны.
Терморегуляторы и клапаны
для местных отопительно-
охлаждающих установок.



Автоматические регуляторы

Регуляторы прямого действия:
регуляторы давления,
перепада давления,
температуры.



Тепловая автоматика

Электрические средства
автоматизации тепловых пунктов
и центральных вентиляционных
установок. Электронные регуляторы,
регулирующие клапаны,
электрические приводы, датчики,
примануальности.



**«Элита» гарантирует
качественное обслуживание и высокую скорость
поставки Danfoss на ваш объект**

1 Склад:

наш склад самый
близкий к вам

2 Скорость:

поставим материал
в кратчайшие сроки

3 Сервис:

покупатель —
лучшее обслуживание

www.elitacompany.com

Санкт-Петербург ☎ (812) 702 4242
Москва ☎ (495) 725 0652
Новосибирск ☎ (383) 271 0220
Екатеринбург ☎ (343) 264 1941
Краснодар ☎ (861) 232 2253

Самара ☎ (846) 222 3291
Новый Новгород ☎ (8312) 748 588
Казань ☎ (843) 555 6900
Иркутск ☎ (3952) 440 434
Ростов-на-Дону ☎ (863) 250 8538

инженерных подходов с возможностями современных методов компьютерного моделирования, в частности, на основе экономических двумерных нестационарных моделей течения.

Настоящая статья посвящена принципам построения такой «гибридной» методики исследования ожидаемых ветровых нагрузок на фасады проектируемого высотного (свыше 75 м) здания. Для расчетов использованы характеристики здания высотой 136 м с горизонтальным сечением сложной формы, проектируемого проектным бюро «Набад» по заказу концерна «Крост» (рис. 1) главный конструктор проекта Г. С. Вайнштейн, главный инженер А. И. Бринчак.

Структура статьи следующая.

Во втором разделе обсуждаются способы задания настилающего ветра, приводятся приближенные методики оценок средних и пиковых ветровых нагрузок с учетом рекомендаций СНиП 2.01.07-85* [2]. Обосновывается усовершенствованная гибридная методика расчета.

В третьем разделе (вторую часть статьи читайте в следующем номере журнала «АВОК») представлены результаты численного моделирования нестационарного двумерного обтекания профиля здания (рис. 1) горизонтальным турбулентным потоком воздуха. Показаны распределения средней и пиковой нагрузок по поверхности фасадов при различных направлениях ветра, определенные с помощью компьютерной технологии STAR-CD [11]. Представлены характерные частоты колебаний вторичной нестационарной составляющей ветровой нагрузки, вызванной образованием кру-

пных вихрей при обтекании профиля здания.

В четвертом разделе приведены обобщающие результаты расчетов ветрового отсоса на поверхности фасадов трехмерного здания в сдвиговом атмосферном пограничном слое для условий города по предложенной гибридной методике с использованием результатов численного моделирования двумерного обтекания профиля здания.

2. Выбор модели приземного пограничного слоя.

Приближенные методики расчета ветровых нагрузок.

Находясь в ветровом потоке, высотное здание испытывает аэродинамические нагрузки, которые складываются, главным образом, из распределений давления по его фасадам (напряжения трения сравнительно малы). Существует два главных фактора, влияющих на характер аэродинамических нагрузок. Это собственная пространственно-временная структура ветра и вторичные струйно-вихревые течения, образующиеся в результате множественных нестационарных отрывов потока на профиле здания.

Поверхность земли с находящейся на ней застройкой, неровностями рельефа местности и т. д. оказывает на движущийся воздух тормозящее воздействие, которое вследствие турбулентного перемешивания распространяется на верхние слои потока, постепенно ослабевая с увеличением высоты z в пределах так называемого пограничного слоя атмосферы. Толщина δ этого слоя имеет порядок от сотен метров до километра. Ожидаемый ветровой режим пограничного слоя

атмосферы в районе застройки (изменение скорости ветра с высотой над поверхностью земли, масштаб и энергетический спектр турбулентности, экстремальные значения скорости ветра и его порывов) есть та априорная информация, которую необходимо задавать при расчете ветровых нагрузок на высотное здание.

Получение информации, обеспечивающей учет всех составляющих пространственно-временной структуры ветра, крайне сложно и вряд ли возможно в настоящее время. При любом способе задания набегающего ветрового потока всегда остается элемент неопределенности, связанный, в частности, с особенностями местных течений (например, в связи с влиянием спутных струй от окрестных сооружений). Чаще всего задается только изменение средней скорости ветра U_m с высотой z над поверхностью земли.

2.1. Средняя составляющая скорости ветра

Из лабораторных и метеорологических исследований известно, что в нижней части турбулентного пограничного слоя напряжение трения мало отличается от приземного трения [12, 13]. Это приводит к логарифмическому закону изменения скорости ветра с высотой:

$$U_m(z) = U_1 / \ln(z_1 / z_*), \quad (1)$$

где $z_* < z < 0,3 \delta$;

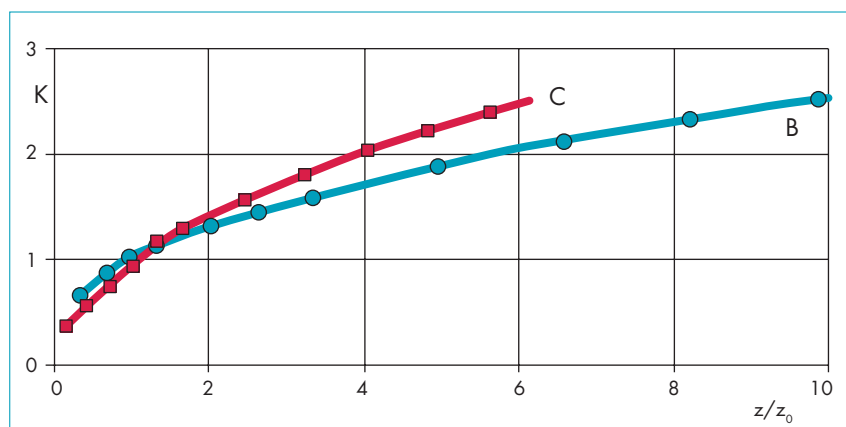
U_1 – скорость ветрового потока на высоте z_1 , м/с;

z_* – параметр, служащий характеристикой размера вихрей вблизи поверхности земли; в пригородах со сплошной невысокой застройкой $z_* = 0,8-1,2$ м; в крупных городах $z_* = 2-3$ м [12].

Более известен исторически первый степенной закон изменения средней скорости ветра по всей толщине $0 < z < \delta$ атмосферного пограничного слоя. Многочисленные разновидности этого закона [2, 5, 12-15] по сути эквивалентны записи:

$$U_m(z) = U_0 (z / z_0)^\alpha, \quad (2)$$

где U_0 – средняя скорость ветрового потока на высоте z_0 , м/с, а показатель степени α зависит от типа местности и может изменяться в диапазоне 0,14–0,4 (в [5, 12] ре-



■ Рис. 2. Нормативная зависимость $K = f(z)$ для типов местности В, С. Значками отмечены данные СНиП [2], линиями – аппроксимирующие кривые [5а), [5б)

комендуется $\alpha = 0,22-0,28$ для пригородов, $\alpha = 0,33-0,4$ – для крупных городов).

Если известна средняя скорость $U_m(z)$, можно вычислить среднюю ветровую нагрузку w_m на наветренной стороне фасада по известной формуле аэродинамики:

$$w_m = \rho U_m^2 / 2, \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³.

С другой стороны, согласно СНиП [2], средняя ветровая нагрузка на высоте z над поверхностью земли определяется формулой:

$$w_m = w_0 K(z) c, \quad (4)$$

где w_0 – нормативное значение ветрового давления, зависящее от ветрового района, Па;

$K = f(z)$ – коэффициент высоты, зависящий от типа местности;

c – аэродинамический коэффициент давления (для наветренной стороны препятствия $c = 1$).

По классификации [2] Москва расположена в I ветровом районе, застройка может соответствовать типам местности «В» и «С», соответствующее нормативное значение $w_0 = 230$ Па.

Табличные данные [2] изменения K с высотой z для типов местности «В» и «С» приведены на рис. 2 вместе с непрерывными аппроксимирующими зависимостями $K = f(z)$, полученными методом наименьших квадратов:

для типа местности «В»:

$$K = (z/z_0)^{0,4}, \quad z_0 = 30,5 \text{ м}; \quad (5a)$$

для типа местности «С»:

$$K = (z/z_0)^{0,5}, \quad z_0 = 60 \text{ м}. \quad (5б)$$

Формулы (3)–(5) позволяют конкретизировать параметры U_0 , z_0 и α в выражении (2), определяющем изменение средней скорости U_m с высотой z над поверхностью земли:

$U_0 = 19,2$ м/с, $z_0 = 30,5$ м, $\alpha = 0,20$ для типа местности «В»;

$U_0 = 19,2$ м/с, $z_0 = 60,0$ м, $\alpha = 0,25$ для типа местности «С».

Другими словами, для условий Москвы можно рассчитывать среднюю ветровую нагрузку w_m на наветренной стороне фасада по формуле (3), вычисляя при этом изменение средней скорости ветра с высотой по формулам:

$$U_m(z) = 19,2 \cdot (z / 30,5)^{0,25}, \quad \text{для типа местности «В»}; \quad (6a)$$

$$U_m(z) = 19,2 \cdot (z / 60)^{0,25}, \quad \text{для типа местности «С»}; \quad (6б)$$

где высота z берется в метрах, а результат получается в м/с.

Таким образом, нормативный средний ветровой поток в ветровом районе I представляет собой сдвиговое течение (2), (6) с нарастающей по высоте скоростью:

от $U_m = 20,3$ м/с на высоте 40 м до $U_m = 26,4$ м/с на высоте 150 м для типа местности «В»;

от $U_m = 17,2$ м/с на высоте 40 м до $U_m = 23,9$ м/с на высоте 150 м для типа местности «С».

2.2. Об учете скорости ветровых порывов

В приземном пограничном слое ветровой поток практически никогда не бывает стационарным, поскольку в нем присутствует большое количество вихрей различных масштабов, которые в совокупности образуют сложные турбулентные структуры.

Достаточно полная информация о структуре турбулентности предполагала бы задание статистических характеристик ветровых пульсаций, таких как амплитудно-частотный спектр, пространственно-временные корреляционные функции, масштаб и кинетическая энергия турбулентности. Попытка частичного учета этих факторов содержится в СНиП [2], где нормативная величина пульсационной составляющей ветровой нагрузки определяется как некоторая доля от среднего значения:

$$w_p = w_m \zeta v,$$

соответственно, суммарный ветровой напор $w = w_m + w_p$ запишется в виде:

$$w = (1 + \zeta v) w_m, \quad (7)$$

где $\zeta = f(z)$ – коэффициент пульсации давления ветра на высоте z ;

v – коэффициент пространственной корреляции пульсации давления ветра, зависящий от размеров площади, подверженной ветровому воздействию [2].

В случае типов местности «В» и «С» табличные данные СНиП для $\zeta = f(z)$ (табл. 7 в [2]) можно аппроксимировать формулами (рис. 3):

$$\zeta = 0,85 (z / z_0)^{-0,2}, \quad z_0 = 30,5 \text{ м},$$

для типа местности «В»; (8a)

$$\zeta = 1,14 (z / z_0)^{-0,25}, \quad z_0 = 60,0 \text{ м},$$

для типа местности «С». (8б)

АСС  **ИНЖИНИРИНГ**
от проекта до объекта

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
ПОСТАВКА, МОНТАЖ
И ТЕХНИЧЕСКОЕ
ОБСЛУЖИВАНИЕ
ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ**

- автоматизация
- диспетчеризация
- вентиляция
- кондиционирование
- энергообеспечение
- слаботочные системы

проектирование, монтаж, обслуживание
систем связи и телекоммуникации

ООО «Группа компаний
«АСС-инжиниринг»
официальный партнер «ТАС»

111020, г. Москва, ул. Горького, д.7, стр.7
Тел. 880-67-48
839-03-83, 839-03-84, 839-03-85
800 20 12 800 27 07 800 09 31

WWW.ROSACC.RU

Таблица

Высота z , м	Средняя скорость U_m , м/с		Характерная максимальная скорость в ветровом порыве V , м/с	
	«В»	«С»	«В»	«С»
40	20,3	17,2	26,6	25,1
70	22,7	19,8	29,4	28,2
110	24,8	22,1	31,3	30,3
150	26,4	23,9	32,9	32,2

С другой стороны, суммарный ветровой напор w можно представить также в виде формулы (3) с соответствующей суммарной скоростью V :

$$w = \rho V^2 / 2, \quad (9)$$

Подстановка (3) и (9) в (7) приводит к следующей оценке скорости в ветровом порыве:

$$V(z) = U_m(z) \sqrt{1 + \xi(z) \nu}. \quad (10)$$

Коэффициент пространственной корреляции ν характеризует неоднородность распределения пиковых значений скорости в ветровых порывах. Согласно СНиП (табл. 9 в [2]) коэффициент ν находится в диапазоне $0,38 < \nu < 0,95$ и зависит от площади и ориентации поверхности, на которой определяется ветровая нагрузка. По смыслу, величина — тем меньше, чем больше площадь компактного фрагмента поверхно-

сти здания, испытывающего ветровой напор или отсос. Это объясняется неодновременностью действия максимальных нагрузок на различные участки поверхности. При оценке ветрового воздействия на участок здания, соизмеримый с его поперечным размером $D \approx 40$ м, имеем согласно [2] $\nu = 0,6-0,7$. Если же речь идет о воздействии ветра на элементы ограждающих конструкций, площадь которых порядка $3i \times 3i$, то с небольшим запасом можно принимать $\nu = 0,9$.

В табл. 1 даны средние и пиковые значения скорости нормативного ветрового потока на различных высотах для типов местности «В» и «С» при $\nu = 0,9$.

Таким образом, можно рассчитывать полную ветровую нагрузку на наветренный фасад здания по формуле (9) со значениями скорости ветра, представленными в табл. 1 или рассчитываемыми по формулам (10), (8), (6). Получающиеся

при этом результаты будут соответствовать СНиП [2].

2.3. Два механизма нестационарного ветрового воздействия на фасады высокого здания

Наличие в настиляющем ветровом потоке нестационарных порывов скорости является лишь одной из причин возникновения интенсивных колебаний ветрового давления на препятствиях. Даже в полностью стационарном потоке могут возбуждаться интенсивные продольные (в направлении ветра) и поперечные аэродинамические нагрузки. Нестационарный характер обтекания высоких зданий обусловливается их неудовлетворительной с аэродинамической точки зрения формой (большой относительной толщиной поперечных сечений, существованием острых кромок и т. п.), что приводит к отрыву пограничного слоя, образованию интенсивных нестационарных струйно-вихревых течений и периодических вихревых следов. В результате аэродинамические нагрузки на поверхности фасадов оказываются зависящими не только от величины и направления ветра, но и от времени.

Наличие в ветровом потоке сдвига и пульсаций скорости еще более усложняет ситуацию, приводя к дополнительным нестационарным воздействиям. В СНиП [2] частично учитывается только первый из отмеченных механизмов возникновения пульсаций ветровой нагрузки, т. е. наличие в настиляющем ветровом потоке нестационарных порывов.

2.4. Методика разделения факторов поддержания нестационарных ветровых воздействий

При сильном ветре характерный масштаб L_0 крупных вихрей в набегающем на здание потоке, как правило, больше поперечного размера здания D [12]. По данным [15] число значимых ветровых порывов составляет 6–7 на протяжении 10 мин. Следовательно, характерный период колебаний скорости набегающего потока $T_0 = L_0 / U_m$ превосходит характерный период $T_1 = D / U_m$ образования и срыва вихрей с поверхности здания. Данное различие основных масштабов времени позволяет упростить задачу расчета нестационарного вклада в распределение ветрового

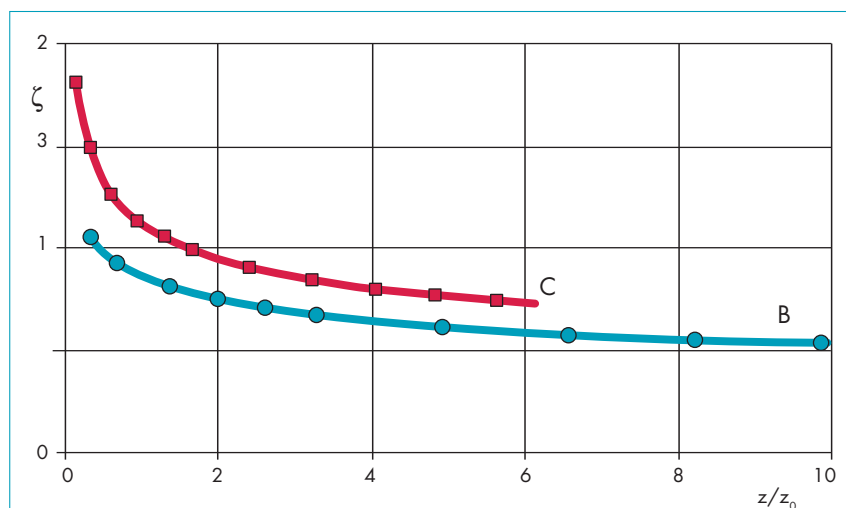


Рис. 3. Зависимость коэффициента пульсаций давления ветра ξ от высоты z для типов местности «В» и «С»

давления по фасадам за счет срыва вихрей при обтекании контура здания. На отрезках времени, не превосходящих длительность глобальных ветровых порывов T_0 , скорость настилающего ветра можно принимать постоянной не зависящей от времени и равной соответствующему мгновенному значению глобальной скорости ветра для данного отрезка времени. Можно также ожидать, что наличие в настилающем ветре нестационарной составляющей скорости будет приводить к эффекту локальной «двумеризации обтекания» (на отдельных частных примерах было замечено, что в ускоренных потоках может снижаться роль трехмерных возмущений, влияющих на потерю устойчивости двумерного обтекания).

В результате, приходим к следующей гибридной методике расчета нестационарного ветрового воздействия на поверхность фасадов высотного здания.

1. Производится численное моделирование нестационарного обтекания изотропным в среднем постоянным (со скоростью U) турбулентным потоком воздуха двумерного тела с формой поперечного сечения, соответствующей горизонтальному сечению исследуемого высокого здания. Результаты расчета представляются в виде безразмерных распределений по периметру здания среднего и пикового значений коэффициента давления C_p :

$$C_p = p - p_{\infty} / 0,5 \rho U^2 \quad (11)$$

и чисел Струхала Sh :

$$Sh = \omega D / U, \quad (12)$$

вычисленных по характерным частотам ω колебаний ветровой нагрузки за счет срыва крупных вихрей.

2. С помощью формул пересчета:

$$w_m = 0,5 \rho U_m(z)^2 C_p; \quad (13)$$

$$w = 0,5 \rho V(z)^2 C_p \quad (14)$$

и выражений (2)–(10) находятся распределения средних и пиковых распределений ветровых нагрузок ω по поверхности фасадов на различных высотах z , а также характерные частоты колебания этих нагрузок:

$$\Omega_m = U_m(z) Sh / D, \\ \Omega = V(z) Sh / D.$$

Уместно сделать следующие замечания.

Замечание 1. Согласно СНиП, влияние сложной формы здания на величину ветровой нагрузки в различных точках фасадов должно определяться либо экспериментально путем продувок в аэродинамической трубе, либо в соответствии с рекомендацией принимать в формуле (4) значение аэродинамического коэффициента $c = 1$ на наветренной стороне здания и $c = -2$ вблизи подветренных острых кромок фасадов. В предлагаемой гибридной методике используется $c = C_p$ (включая вторичную пульсационную составляющую), где распределение C_p по поверхности здания получается из расчета нестационарного обтекания задаваемого конкретного профиля здания.

Замечание 2. Было бы неверно понимать указанный в разделе 6.11 СНиП [2] «коэффициент надежности по ветровой нагрузке» $\gamma_f = 1,4$ как множитель при вычислении суммарного ветрового давления по формуле (9) $w = (w_m + w_p) \gamma_f$, поскольку на самом деле в СНиП этот коэффициент используется лишь при определении вспомогательной величины ϵ (см. раздел 6.76) и не влияет прямо на величину суммарного ветрового воздействия.

Замечание 3. Данная методика нацелена на определение местных ветровых нагрузок, что необходимо для расчета таких элементов ограждения зданий, как оконные проемы, витражи, облицовочные элементы вентилируемых навесных фасадов и т. п. Попытки определять таким же способом общую интегральную нагрузку на все здание могут привести к значительно завышенным оценкам, поскольку не учитывается, что при действительном трехмерном обтекании здания срыв вихрей на разных высотах происходит не синхронно.

Литература

1. Петер Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1984.
2. СНиП 2.01.07–85. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия. – М.: Госстрой, 1986.
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. Табунщиков Ю. А., Шилкин Н. В. Аэродинамика высотных зданий // АВОК. – 2004. – № 8.

6. Гутников В. А., Кирякин В. Ю., Лифанов И. К., Сетуша А. В. Математическое моделирование аэродинамики городской застройки. – М.: Изд-во «ПАСЬБА», 2002.

7. Wind Engineering – Building Aerodynamics. Force Technology. www.force.dk.

8. Бедаш С. Н., Борисов А. В., Гагарин В. Г., Гувернюк С. В., Козлов В. В., Петров Д. Н. Расчет аэродинамики и дождевого увлажнения стен высотных зданий. // Ломоносовские чтения. Научная конференция. Секция механики. – М.: Изд-во Московского ун-та. 2005.

9. Исаев С. А., Судаков А. Г., Харченко В. Б., Усачов А. Е. Численное моделирование турбулентных отрывных течений в задачах внешней аэродинамики с помощью многоблочных вычислительных технологий. Модели и методы аэродинамики. Материалы Шестой Международной школы-семинара, Евпатория, 5–14 июня, 2006 г. – М.: МЦНМО, 2006.

10. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А. В. Ермашина и С. А. Исаева. – М.: Изд-во Московского ун-та, 2003.

11. STAR-CD. Version 3.20. Methodology. CD Adapco Group, Computational Dynamics Limited, 2004.

12. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат. 1984.

13. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974.

14. Борисенко М. М. Вертикальные профили ветра и температуры в нижних слоях атмосферы // Труды ГГО. – Вып. 320. – М., 1974.

15. Старков А. Н., Безруких П. П., Ландберг Л., Борисенко М. М. Атлас ветров России. – Изд-во Можайск-Терра, 2000.

16. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие / И. А. Белов, С. А. Исаев. – СПб.: Балтийский гос. ун-т, 2001.

Тел. (495)

Вторую часть статьи читайте в следующем номере журнала «АВОК».