

НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

М И С И



О.И. Поддаева
А.С. Кубенин
П.С. Чурин

АРХИТЕКТУРНО- СТРОИТЕЛЬНАЯ АЭРОДИНАМИКА



СТРОИТЕЛЬСТВО
АРХИТЕКТУРА

Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

О.И. Поддаева, А.С. Кубенин, П.С. Чурин

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ АЭРОДИНАМИКА

Учебное пособие

Москва 2015

УДК 533.6
ББК 22.253.3
П44

Р е ц е н з е н т ы :

доктор физико-математических наук *А.А. Локтев*, декан факультета информатизации, экономики и управления, заведующий кафедрой транспортного строительства Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ); доктор технических наук, профессор *О.О. Егорычев*, главный научный сотрудник УНПЛ ААИСК НИУ МГСУ

*Учебное пособие разработано при финансовой поддержке
Министерства образования и науки РФ
в рамках выполнения государственного задания
ФГБОУ ВПО «МГСУ» № 2014/107, проект «Фундаментальные исследования
ветровых воздействий (в том числе экстремальных)
на уникальные здания и сооружения, а также мостовые конструкции»*

Поддаева, О.И.

П44 Архитектурно-строительная аэродинамика : учебное пособие / О.И. Поддаева, А.С. Кубенин, П.С. Чурин ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. Москва : НИУ МГСУ, 2015. 88 с.
ISBN 978-5-7264-1194-1

Рассматриваются основные вопросы, связанные с аэродинамикой зданий и сооружений, характеристики экспериментального оборудования, основы проведения испытаний в аэродинамических трубах, а также основные программные пакеты, предназначенные для численного моделирования, и их особенности на примере мультизадачного комплекса ANSYS CFX.

Для студентов бакалавриата направлений подготовки 08.03.01 Строительство и 07.03.01 Архитектура очной формы обучения. Представляет интерес для технических специалистов и научных сотрудников, работающих в сфере аэродинамики зданий и сооружений.

**УДК 533.6
ББК 22.253.3**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное строительство характеризуется применением новых эффективных конструкций, а также постоянно растущей этажностью высотных зданий и увеличением пролетов большепролетных конструкций, что требует использования всех достижений современной науки и техники. Одну из важнейших ролей в этом процессе играет архитектурно-строительная аэродинамика, изучающая аэродинамические явления, связанные с задачами архитектуры и строительства.

В настоящее время данная отрасль аэродинамики развивается по двум основным направлениям — экспериментальное моделирование в специализированных аэродинамических трубах и численное моделирование в специализированных программных пакетах газо- и гидродинамики. При этом действующие на территории Российской Федерации нормативные документы регламентируют проведение именно экспериментальных исследований для определения ветровой нагрузки на высотные и уникальные здания и сооружения.

1. ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ

1.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

Аэродинамика — раздел механики сплошных сред, в котором изучаются закономерности движения воздуха и других газов, а также характеристики тел, движущихся в воздухе.

Рассмотрим кратко основные характеристики воздушной среды:

- *Воздух* — смесь газов (главным образом азота и кислорода). В составе воздуха содержится около 21 % кислорода и 79 % азота.

- *Давление* — сила, действующая на единицу площади поверхности и перпендикулярная ей. Обозначается обычно буквой P , измеряется в килограммах на единицу площади ($\text{кг}/\text{м}^2$, $\text{кг}/\text{см}^2$, атм.). Воздух производит давление у земли, равное весу столба воздуха от верхней границы атмосферы до земли (на уровне моря $t = +15^\circ\text{C}$), что соответствует $1,0332 \text{ кг}/\text{см}^2$.

- *Температура* — мера нагретости тела. Она определяет скорость хаотического движения молекул. Измеряется в градусах Цельсия, Кельвина или Фаренгейта. В шкале Цельсия за 0 градусов взята температура замерзания чистой воды при давлении 760 мм рт. ст., в шкале Кельвина — температура прекращения движения молекул (-273°), в шкале Фаренгейта — температура замерзания насыщенного раствора соли в воде. Размерности шкалы Цельсия и Кельвина совпадают, а шкала Фаренгейта имеет свою размерность. Ноль градусов по Цельсию соответствует $+32^\circ$ Фаренгейта, температура человеческого тела ($36,6^\circ\text{C}$) соответствует $+97,88^\circ$ Фаренгейта, точка кипения воды (100°C) равна $+212^\circ$ Фаренгейта. Перевод из шкалы Фаренгейта в шкалу Цельсия происходит по следующей формуле:

$$(t^\circ\text{F} - 32) 0,55 = t^\circ\text{C};$$

перевод из шкалы Цельсия в шкалу Фаренгейта — по формуле

$$t^\circ\text{C} \cdot 1,8 + 32 = t^\circ\text{F}.$$

- *Плотность*. В аэродинамике под плотностью обычно понимают массовую плотность. Она характеризует кинетическую энергию молекул воздуха, обозначается греческой буквой ρ (читается «ро»). Массовая плотность — это масса воздуха, содержащаяся в объеме 1 куб. м (м^3).

1.2. ВЕТРОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Метеорологические явления, происходящие в атмосфере Земли, вызваны солнечной радиацией. Солнечная радиация способствует повышению температуры и давления, отвечающих за перемещение воздушных масс. Анализ воздействия ветра на конструкции основывается на

оценке скорости ветра v на строительной площадке, где ветер рассматривается как компонент более широкой и сложной атмосферной и метеорологической системы.

Первоначально предполагается, что конструкция устойчива и не деформируема, ветер оказывает влияние на конструкцию в целом и на ее части системой аэродинамических действий F_s , которые зависят от формы, ориентации и размеров сооружения.

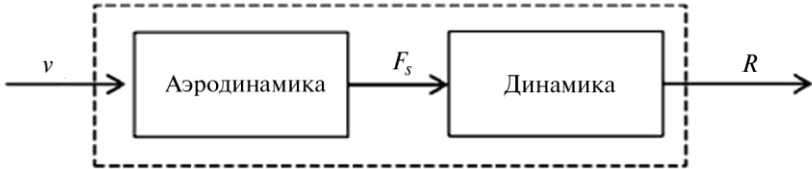


Рис. 1.1. Структурная схема, отражающая реакцию конструкции на действие ветра

Считается, что конструкция подвергается прогибу под действием ветра, однако такой прогиб достаточно мал. Поэтому геометрия деформации практически не меняется по сравнению с геометрией первоначальной конструкции. Реакция R может быть установлена посредством классического метода структурного анализа. Она может быть статической для жестких конструкций и динамической — для гибких конструкций. На рис. 1.1 показана блок-схема, которая превращает скорость ветра v в реакцию конструкции R .

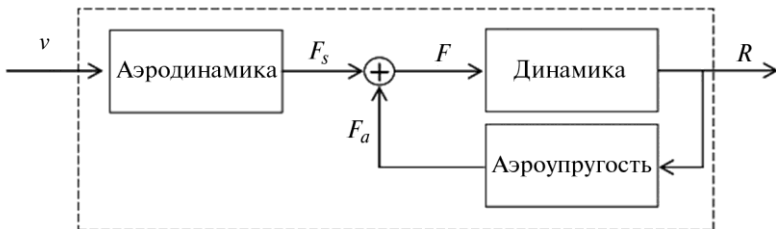


Рис. 1.2. Структурная схема реакции конструкции с учетом аэроупругого явления

На практике, особенно в легких и гибких конструкциях, обладающих аэродинамической формой, чувствительной к ветровому воздействию, могут возникнуть колебания достаточно большой величины, за счет чего происходит усиление взаимодействия системы ветер — конструкция. Это явление известно как аэроупругость, или явление обратной связи, и оно изменяет надвигающийся ветер со скоростью v , аэро-

динамическое действие F_S и реакцию конструкции R . Это явление обычно изображают схематично, предполагая, что ветер вызывает общее действие $F = F_s + F_a$ на конструкцию, где F_s — аэродинамическое действие, оказываемое ветром на фиксированную конструкцию; F_a — аэроупругость, или самовозбуждающиеся действия за счет движения конструкции. На рис. 1.2 приведена структурная схема рис. 1.1, модифицированная включением аэроупругости.

Ветер является причиной, которая вызывает ответную реакцию сооружения и его частей, и степень этой реакции зависит от аэродинамики, динамики и аэроупругости сооружения.

1.3. АТМОСФЕРНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ

Атмосферные явления, происходящие в газовой оболочке, окружающей Землю, вызваны солнечной радиацией. Нагретые солнцем земля и атмосфера возвращают энергию, которую они получают, испуская тепловое излучение. Приземный слой атмосферы в непосредственной близости от основного источника тепла, т.е. суши, сохраняет большее количество тепла. Это приводит к росту вертикального профиля среднего значения температуры T (рис. 1.3), которая приблизительно линейно уменьшается по отношению к высоте Z .

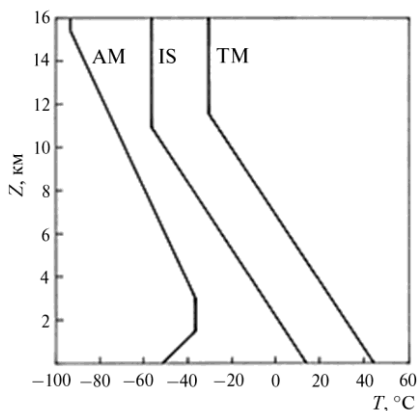


Рис. 1.3. Главные вертикальные профили атмосферной температуры:
 AM — арктический минимум;
 IS — средняя земная температура;
 TM — тропический максимум (аббревиатура IS для международных стандартов)

Разница между полученной энергией и энергией, излученной системой земля — атмосфера, варьируется в соответствии с разным углом солнечных лучей относительно горизонта, что приводит к самым высоким уровням радиации в тропических и экваториальных регионах и минимальным уровням на полюсах (см. рис. 1.3). В таких регионах средняя температура (тропический максимум, или TM) больше, чем средняя земная температура (IS), из-за чего образуются зоны низкого давления; в последнем случае (арктический минимум, или AM) температура ниже, чем IS. В этом

случае образуется зона высокого давления. Если температура не затронута другими факторами, воздух циркулирует в каждом полушарии соответственно единственному сектору, простирающемуся от полюса до экватора (рис. 1.4)

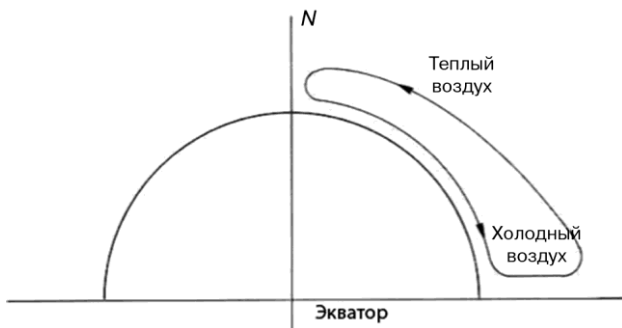


Рис. 1.4. Идеальная одноклеточная циркуляция воздуха

На практике неравномерное распределение океанов, континентов и облаков приводит к образованию субтропической зоны высокого давления и субполярной зоны низкого давления. Таким образом получается трехклеточная система циркуляции в каждом полушарии (рис. 1.5).

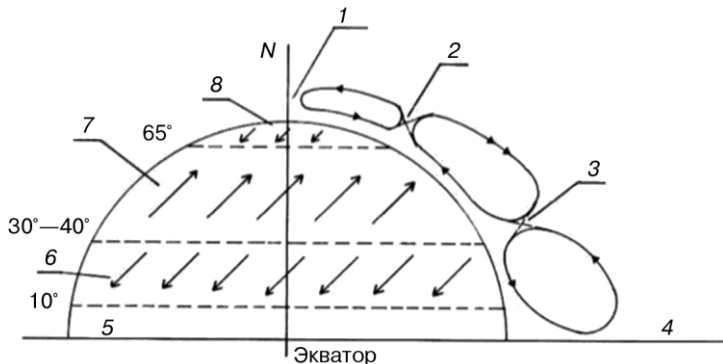


Рис. 1.5. Эффективная трехклеточная циркуляция воздуха:

- 1 — полярное высокое давление; 2 — субполярное низкое давление;
- 3 — субтропическое высокое давление; 4 — экваториальное низкое давление;
- 5 — экваториальная штилевая полоса; 6 — пассаты; 7 — западные ветра;
- 8 — восточные ветра

Поверхностными ветрами такой трехклеточной системы являются западные, восточные и пассаты (в зависимости от широты их распространения). Совокупность этих ветров составляет первичную циркуля-

цию и включает в себя ветры, которые развиваются в течение месячных или сезонных периодов на областях планетарного масштаба. Эти ветры влияют на установление погодных условий на Земле. Однако они имеют умеренную скорость (обычно меньше, чем 4—5 м/с) и тем самым оказывают незначительное влияние на конструкции.

Вторичная циркуляция определяется как сочетание ветров, формирующих зоны низкого и высокого давления благодаря локальному нагреванию или охлаждению нижних атмосферных слоев (рис. 1.6). Эти ветры развиваются периодами от нескольких дней до одной недели на площадях размером от нескольких сотен до тысяч квадратных километров. Они включают циклоны, антициклоны и муссоны. В отличие от эффекта первичной циркуляции, вторичная циркуляция определяет локальные погодные условия.

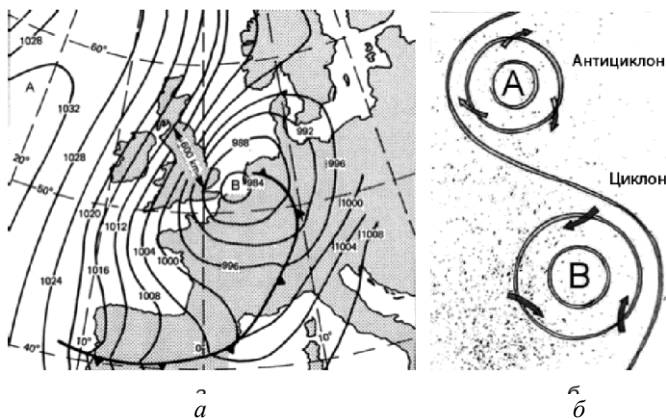


Рис. 1.6. Карта изобар (а), циклоны и антициклоны (б)

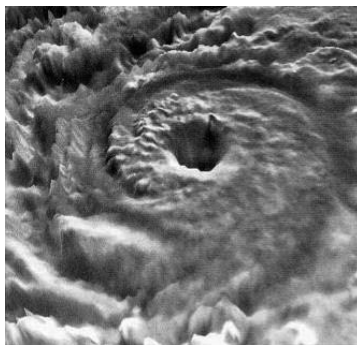


Рис. 1.7. Тропические циклоны

Циклоны — это ветры, которые дуют в направлении концентрации изобар вокруг зоны низкого давления (см. рис. 1.6). Направление циркуляции в них: против часовой стрелки — в северном полушарии и по часовой стрелке — в южном. Циклоны подразделяются на внетропические и тропические (в зависимости от места формирования).

Внетропические циклоны формируются от встречи в субполярной

зоне холодного полярного воздуха, переносимого восточными ветрами, и горячего тропического воздуха, движимого западными ветрами (рис. 1.7). Столкновение двух атмосферных фронтов с разной температурой можно образно толковать как столкновение между двумя воюющими армиями. В рассматриваемом случае эта встреча вызовет бурю.

Тропические циклоны (см. рис. 1.7) возникают в экваториальной штилевой полосе (см. рис. 1.6), и они черпают свою энергию от скрытого тепла, выделяющегося при конденсации водяного пара. Относительно внетропических циклонов тропические обычно меньше в размерах, хотя скорость ветра, как правило, бывает гораздо выше, а их разрушительная сила намного больше. В Соединенных Штатах Америки тропические циклоны классифицируются как ураганы, когда скорость ветра превышает 120 км/ч; то же самое явление на Дальнем Востоке называется тайфунами, а в Австралии и в Индийском океане — просто циклоны.

Антициклоны — это ветры, которые дуют в направлении концентрации изобар внутри зон высокого давления (см. рис. 1.6). Направление циркуляции в них: по часовой стрелке в северном полушарии и против часовой стрелки — в южном.

В отличие от циклонов, антициклоны, как правило, больше в размерах и более пассивны в природе. Они создают относительно спокойную погоду и легкий ветер.

Особо следует отметить атмосферные движения сезонного характера, вызванные разницей температур между океанами и континентальными массивами суши. По всей Азии и прилегающей части Индийского океана эти движения достаточны для возникновения ветров, известных как муссоны, которые считаются неотъемлемой частью вторичной системы циркуляции.

Локальные ветры составляют движение воздушных масс, возникающих внутри вторичной циркуляционной системы без изменения относительных свойств. Эти ветры покрывают ограниченные территории нескольких километров и, как правило, непродолжительны — обычно не более пары часов, хотя относительная скорость может достигать очень больших значений. Локальные ветры в целом подразделяются на две главные категории, связанные соответственно с конкретными географическими положениями и специальными атмосферными условиями.

Ветры, связанные с конкретными географическими положениями, включают в себя бризы, фён и стоковые ветры. Бризы повторяются ежедневно и обычно имеют умеренную скорость; они проявляются в прибрежных районах, на холмистых местностях или на горных склонах. Фён образуется, когда воздушная масса поднимается над возвышением, охлаждаясь таким образом, и затем спускается по противоположной стороне,

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
1. Основы аэродинамики	4
1.1. Характеристики воздушной среды	4
1.2. Ветровое воздействие	4
1.3. Атмосферная циркуляция	6
1.4. Моделирование ветрового потока	12
1.5. Основы климатического анализа площадки строительства	17
1.5.1. Средняя составляющая скорости ветра	17
1.5.2. Об учете скорости ветровых порывов	20
2. Основные принципы и положения экспериментальной аэродинамики	22
2.1. Критерии аэродинамического подобия	22
2.2. Аэродинамика конструкций	26
2.3. Интерференция	32
2.4. Особенности испытательного стенда для проведения исследований аэродинамики строительных конструкций	35
3. Задачи, особенности и этапы проведения испытаний по исследованию аэродинамики строительных конструкций	39
3.1. Макетирование	40
3.2. Проведение экспериментальных исследований	42
3.2.1. Контроль за характеристиками потока	42
3.2.2. Определение распределения аэродинамического коэффициента внешнего давления по поверхности исследуемого объекта	44
3.2.3. Определение интегральных аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления, поперечной силы и крутящего момента	47
3.2.4. Визуализация и исследование обтекания объекта	50
4. Численное моделирование аэродинамики строительных сооружений и конструкций	54
4.1. Обзор прикладных программных систем инженерного анализа	54
4.2. Описание пакета ANSYS CFX	57
4.3. Пример работы в ANSYS CFX	60
4.3.1. Создание расчетной области	60
4.3.2. Создание расчетной сетки	68
4.3.3. Формирование расчетной модели в CFX-Pre	73
4.3.4. Создание и редактирование граничных условий	75
4.3.5. Обработка результатов	79
Библиографический список	82
Приложение. Примеры численного моделирования ветровых воздействий на строительные объекты в программном пакете ANSYS CFX	83

Учебное издание

Поддаева Ольга Игоревна, **Кубенин** Александр Сергеевич,
Чурин Павел Сергеевич

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ АЭРОДИНАМИКА

Учебное пособие

Редактор *А.К. Смирнова*
Корректор *В.К. Чупрова*
Компьютерная правка, верстка *О.В. Суховой*
Дизайн обложки *Д.Л. Разумного*

Подписано в печать 17.12.2015. И-169. Формат 60×84/16.
Уч.-изд. л. 5,28. Усл. печ. л. 5,11. Тираж 100 экз. Заказ 424

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет» (НИУ МГСУ).

129337, Москва, Ярославское ш., 26.

Издательство МИСИ — МГСУ.

Тел. (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75, (499) 183-97-95.

Е-mail: ric@mgsu.ru, rio@mgsu.ru.

Отпечатано в типографии Издательства МИСИ — МГСУ.

Тел. (499) 183-91-90, (499) 183-67-92, (499) 183-91-44